УДК 681.586.5 DOI: 10.7242/2658-705X/2026.3.1

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ. ОБЗОР

Матвеенко В.П., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
Сероваев Г.С., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Работа посвящена обзору исследований, связанных с измерением деформаций волоконно-оптическими датчиками (ВОД). Рассмотрены точечные ВОД на основе брэгговской решетки и распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния. Приводится краткая история появления ВОД и краткая информация о принципах работы точечных и распределенных датчиков. Приведены варианты применения ВОД в авиационных конструкциях, геотехническом мониторинге, строительной инфраструктуре, медицине и биомеханике. Основное внимание уделено факторам, определяющим достоверность значений деформаций, измеряемых точечными и распределенными ВОД: передаче деформаций от объекта измерений к зоне оптического волокна, обеспечивающей измерения; изменению структуры и напряженно-деформированного состояния в материале после встраивания в него ВОД; учету сложно-напряженного состояния в оптическом волокне при вычислении деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиком; влиянию температуры и влажности; влиянию градиента деформаций. Проанализировано направление, связанное с измерением встроенными в материал ВОД технологических и остаточных деформаций в полимерных и композиционных материалах, изготовленных различными технологиями химического формования и аддитивными технологиями. Показано, что корректная интерпретация показаний датчиков требует учета физических принципов измерения, условий закрепления или встраивания, свойств материала и алгоритмов обработки данных. Рассмотрены перспективные направления применения ВОД.

Ключевые слова: *измерение деформаций, волоконно-оптические датчики, волоконная брэгговская решетка, оптическая рефлектометрия в частотной области, точечные датчики, распределенные датчики, полимерный композитный материал*

История появления волоконно-оптических датчиков деформаций

Измерение деформаций является одной из ключевых задач при мониторинге механического состояния машин, конструкций и сооружений. Для решения этой задачи применяются механические, гидравлические, оптические, тензорезистивные и пьезоэлектрические датчики, контактные и бесконтактные экстензометры. Развитие волоконной оптики в 1980-х годах привело к появлению 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 исследовании [2] были сформулированы основные концепции работы оптических волокон и теоретически продемонстрировано их потенциальное преимущество при передаче информации по сравнению с медным кабелем. Главная проблема на пути к широкому использованию оптического волокна была связана с высоким уровнем затухания в стеклянных волноводах. К 1970 году было получено кварцевое оптическое волокно с низким уровнем затухания и пропускной способностью, превышающей медный провод в 65000 раз [3]. Далее происходил

©Авторы 2026 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

экспоненциальный рост количества научных исследований в области фотоники и волоконной оптики. Начали появляться работы, 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 сердцевины оптического волокна при интенсивном воздействии ультрафиолетового излучения (УФ) на некоторую область оптического волокна [5]. 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].

Классификация волоконно-оптических датчиков

ВБР представляет собой периодическое изменение показателя преломления на определенной области сердцевины 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. Резонансная (брэгговская) длина волны λ_B отраженного сигнала пропорциональна эффективному показателю преломления сердцевины оптического волокна в области решетки n и геометрической длине периода решетки Λ [7,8]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

Общий вид зависимости сдвига резонансной длины волны от компонент тензора деформаций для двух независимых направлений поляризации в плоскости, перпендикулярной продольной оси оптического волокна, можно записать в виде [8]:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n_1^2(p_{11}\varepsilon_1 + p_{12}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)),$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n_2^2(p_{11}\varepsilon_2 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)),$$

где ε_3 – главная деформация вдоль оптического волокна; ε_1, ε_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 λ_1, λ_2 и отсчетный λ_B моменты времени; p_{11}, p_{12} – коэффициенты фотоупругости.

Для двулучепреломляющего оптического волокна $n_1 \neq n_2$. В оптически изотропном материале $n_1 = n_2 = n$. Для кварцевых и германосиликатных оптических волокон в литературе приводятся различные экспериментально определенные значения показателя преломления и фотоупругих коэффициентов. В качестве типичных значений используются $n \approx 1.45 – 1.46$, $p_{11} \approx 0.113 – 0.125$, $p_{12} \approx 0.252 – 0.258$ [9–11].

Наиболее распространен вариант соотношений для одноосного напряженного состояния, при котором $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_3$, где ν – 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 ε_3:

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

Для кварцевых оптических волокон при использовании типичных значений оптических и фотоупругих параметров $k \approx 0.78$.

При измерении деформаций необходимо учитывать влияние температуры. В случае одноосного деформирования волокна относительное изменение резонансной длины волны может быть записано в виде [12]:

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

где $\Delta T = T_1 - T_0$; T_1, T_0 – температура в окрестности датчика в текущий и отсчетный моменты времени; $\alpha = (1 / \Lambda)(\partial\Lambda / \partial T)$ – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР); $\beta = (1 - n)(\partial n / \partial T)$ – термооптический коэффициент.

В отличие от точечных ВОД, в распределенном ВОД в качестве чувствительного элемента используется вся длина оптического волокна. В основе распределенных ВОД лежит измерение оптического рассеяния, возникающего в результате взаимодействия света с материалом в световоде оптического волокна. Выделяют три основных вида рассеяния, используемых в распределенных ВОД: рэлеевское (упругое), бриллюэновское и рамановское (комбинированное) рассеяния [13].

Среди распределенных ВОД наилучшим пространственным разрешением обладает метод, основанный на измерении спектрального сдвига в обратном рэлеевском рассеянии методом оптической рефлектометрии в частотной области (Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR) с использованием поляризационных измерений, который позволяет проводить распределенные измерения деформаций и температуры при помощи стандартного одномодового оптического волокна [14].

В основе OFDR лежит интерферометрическая схема с лазерным источником, перестраиваемым по длине волны. Одно плечо интерферометра является опорным, а второе содержит тестируемое оптическое волокно. Интерференционный сигнал, возникающий при смешении излучения из опорного и измерительного плеч, анализируется с использованием преобразования Фурье. Это позволяет получить рефлектограмму, представляющую собой распределение уровня отраженного сигнала в зависимости от расстояния вдоль тестируемого оптического волокна [15]. Измерительные системы на основе OFDR характеризуются высоким пространственным разрешением, но уступают распределенным методам на основе бриллюэновского и рамановского рассеяния по максимальной длине измерительной линии.

Принцип измерения деформаций на основе метода OFDR 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 деформаций или температуры

с помощью рефлектометра обратного рассеяния на рефлектограмме тестируемого оптического волокна выбирается анализируемый участок волокна. Этот участок разбивается на подобласти заданной длины (база датчика, Δx) 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 распределенного 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 состояния. Для определения деформации или температуры в каждом анализируемом окне Δx рассчитывают величину спектрального сдвига относительно эталонной рефлектограммы, после чего этот сдвиг пересчитывают в искомую величину с использованием соответствующих коэффициентов деформационной и температурной чувствительностей оптического волокна.

Определяемый в окне анализа спектральный сдвиг обратного рэлеевского рассеяния $\Delta\nu$ аналогичен сдвигу резонансной длины волны ВБР $\Delta\lambda$ и связан с изменением осевой деформации и температуры оптического волокна следующим образом:

$$\Delta\lambda/\lambda = -\Delta\nu/\nu = K_\varepsilon \varepsilon_3 + K_T \Delta T ,$$

где K_T и K_ε – 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:

$$\Delta T = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_T}\Delta\nu ,$$

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

Изменение деформации с учетом температурной компенсации можно выразить:

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

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

Различные способы одновременного измерения деформаций и температуры с помощью волоконно-оптических датчиков рассмотрены в работе [16].

Несмотря на очевидные преимущества распределенных систем измерения деформаций методом OFDR на основе рэлеевского рассеяния, данные системы значительно уступают традиционным интеррогаторам ВБР датчиков в скорости опроса датчиков (сотни Гц против нескольких кГц) [17].

Для любого типа чувствительных элементов, в том числе ВОД, важной задачей является обеспечение точности измерений и валидации результатов. В работе [18] на примере испытаний на усталость и рост трещины показано, что измерения деформаций, выполняемые распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния, хорошо согласуются с показаниями точечных ВБР датчиков и традиционных тензорезистивных датчиков в областях с умеренным градиентом деформаций. Измерение деформаций в областях с высоким градиентом деформаций с помощью распределенных ВОД

осложнено и может приводить к потере информации в силу сложности кросскорреляционного анализа [19]. Для повышения достоверности измерений в работе [20] предложен подход к калибровке показаний распределенных ВОД по данным конечного числа точечных ВБР датчиков.

Отдельной задачей является корректное сравнение точечных и распределенных ВОД. Как правило, такие измерения выполняются на разных оптических волокнах, расположенных вблизи друг от друга. Более достоверным является сравнение двух измерительных систем на одном оптическом волокне. В работе [21] рассмотрена задача измерения деформаций с помощью распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния при наличии в измерительном оптическом волокне одной или нескольких ВБР с высокой отражательной способностью. Показано, что при сканировании оптического волокна рефлектометром обратного рассеяния в диапазоне длин волн, включающем резонансные длины волн ВБР, возникает высокий уровень шума, а стандартные алгоритмы обработки данных не позволяют надежно выделить полезный сигнал. Сканирование вне резонансных длин волн ВБР устраняет этот шум, однако приводит к появлению нечувствительных зон в окрестности решеток. Для восстановления значений деформации в этих зонах предложен алгоритм, основанный на оконном преобразовании Фурье с оконной функцией Ханна. Работоспособность алгоритма продемонстрирована при измерении однородных и градиентных полей деформаций. В работе [22] исследуется точность измерения деформаций точечными ВОД на основе ВБР и распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния при помощи калибровочных экспериментов на балке равного сопротивления. Результаты исследования демонстрируют высокий уровень соответствия показаний всех чувствительных элементов и отличаются в переделах 5% от результатов численного моделирования методом конечных элементов.

Области применения волоконно-оптических датчиков

ВОД имеют ряд преимуществ по сравнению со многими традиционными средствами измерения: они устойчивы к электромагнитным помехам, 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 [13, 23]. Малые размеры оптического волокна позволяют фиксировать ВОД как на поверхности конструкции, так и внедрять их в структуру материала, что открывает возможности для регистрации механического состояния не только в процессе эксплуатации, но и на этапе изготовления [24–27]. Благодаря этим особенностям ВОД находят применение в различных отраслях промышленности и техники, включая аэрокосмическую [28, 29], геотехническую [30–32], строительную [33–37] области, а также другие направления [38].

ВОД обеспечивают решение различных задач в авиационных конструкциях: выполняют роль чувствительного элемента в системе защиты летательных аппаратов от обледенения [39]; одиночные ВБР и розетки на их основе используются для мониторинга механического состояния шасси [40, 41]; ВОД применяются для контроля прогибов лонжерона крыла самолета [42], мониторинга его формоизменения и оценки действующих нагрузок [43–45], измерения деформаций при динамических испытаниях крыла в аэродинамической трубе [46]. В работах [47] и [48] продемонстрировано применение ВОД для регистрации деформированного состояния крыла в условиях

полета на беспилотном летательном аппарате и на среднемагистральном пассажирском самолете. Перспективы применения ВОД в изделиях из композитных материалов продемонстрированы в работе [49] при измерении деформаций датчиками, встроенными в композитный материал, из которого изготовлены элементы вертолета.

Перспективы ВОД связаны с их применением в смарт-материалах [50]. В качестве примеров можно привести их использование в системах активной волновой диагностики изделий из композиционных материалов [51–58], а также для измерения деформированной формы конструктивных элементов самолета [59, 60].

Геотехнический мониторинг является одной из естественных областей применения волоконно-оптических датчиков, поскольку многие контролируемые процессы развиваются не локально, а в пределах протяженных зон: в грунтовых массивах, склонах, сваях, анкерах, тоннелях, подземных выработках и областях осадок. Для подземных и водонасыщенных сред существенное значение также имеют долговечность измерительной системы, герметичность, устойчивость к электромагнитным воздействиям и возможность удаленного опроса [31, 61]. ВБР датчики в геотехнических задачах применяются главным образом как точечные или квазираспределенные чувствительные элементы, встроенные в специализированные преобразователи либо закрепленные на конструктивных элементах. В обзоре применений ВБР датчиков в геотехнических сооружениях [62] в качестве основных направлений выделены мониторинг состояния грунта и склонов. Практическая значимость использования ВОД показана в работах [63, 64], где на основе ВБР реализованы датчики наклона, линейного перемещения, порового давления и давления грунта для автоматизированного контроля устойчивости склонов и процессов просадки.

Анализ работ показал, что в геотехническом мониторинге наиболее востребованы распределенные ВОД. Показательной является работа [65], где приводятся результаты физического эксперимента по раннему обнаружению оползня, инициированного дождевыми осадками, в котором волокно было уложено вблизи ожидаемой поверхности скольжения, а регистрация деформаций позволила проследить эволюцию деформаций с сантиметровым пространственным разрешением вплоть до момента разрушения. Применение ВОД для контроля оползней показало значительную эффективность в качестве инструмента раннего оповещения и прогнозирования, но при этом отмечается сложность установки оптоволоконных кабелей в грунтовый массив склона. Необходимо отметить востребованность различных типов распределенных ВОД, в частности на основе бриллюэновского рассеяния, которые чаще используются на объектах большой протяженности [66, 67].

Современные исследования расширяют область применения ВОД в геотехнике. В исследованиях, посвященных мониторингу карстовых провалов, ВОД, встроенные в грунт, позволили регистрировать развитие провала и связанных с ним зон сдвига, а измеренные деформации использовались совместно с методом PIV и искусственной нейронной сетью для оценки осадки поверхности [68]. Обзор применения ВОД для мониторинга природных геологических угроз [69] подтверждает, что такие системы эффективно используются для раннего предупреждения при оползнях, просадках, землетрясениях и вулканической активности.

В области гражданского строительства применение ВОД направлено на мониторинг механического состояния мостов, тоннелей, зданий, трубопроводов,

автомобильных дорог, железнодорожных путей и других инфраструктурных объектов. В таких системах особенно востребован длительный контроль деформаций, температуры, трещинообразования, прогибов, перераспределения усилий и локальных зон деградации материала. Обзоры [70, 71] показывают, что ВОД заняли устойчивое место в задачах мониторинга технического состояния инфраструктуры, обеспечивая непрерывный контроль протяженных объектов. Следует отметить применение систем на основе обратного рэлеевского рассеяния как для эксплуатационного мониторинга, так и для контроля состояния конструкций на этапе строительства [72].

Важное значение имеет интерпретация получаемых с ВОД данных. Например, при оценке влияния близлежащего строительства на тоннель метрополитена в Барселоне [73]. Интерпретация данных, получаемых с ВОД, осуществлялась на основе сопоставления результатов измерения с расчетной моделью объекта. В железнодорожной инфраструктуре датчики на основе обратного рэлеевского рассеяния использовались для регистрации деформаций рельс в лабораторных и полевых условиях и показали перспективность таких систем не только для статического, но и для динамического мониторинга [74]. Для мостовых сооружений применение распределенных ВОД демонстрирует возможность длительного контроля трещин и зон риска в железобетонных элементах, в том числе при коррозионном растрескивании [75].

В медицине и биомеханике ВОД применяются как средство получения информации в условиях, где существенны гибкость чувствительного элемента, совместимость с медицинскими инструментами и мягкими тканями, а также минимальное влияние датчика на медицинскую процедуру. Существующие обзоры применения ВБР в биомеханике указывают на широкий круг возможных задач, от регистрации деформаций костей и давления в ортопедических суставах до измерения усилий в сухожилиях, углов сегментов тела при ходьбе и контактного давления [76]. Одним из наиболее развитых направлений является определение формы медицинских инструментов. В работе [77] показано, что распределенная регистрация деформаций методом OFDR может использоваться для отслеживания формы хирургических игл. В работе [78] продемонстрирована высокоточная система реконструкции формы гибкого инструмента на основе ВБР датчиков для задач эндоваскулярной навигации. Аналогичный подход реализован в работе [79] при реконструкции формы катетера для двумерного и трехмерного случаев. Применение распределенных ВОД позволяет отслеживать изгиб иглы и измерять ее кривизну при прохождении через среды различной жесткости [80]. ВБР, встроенные в мягкую полимерную матрицу на поршне шприца, обеспечивают регистрацию усилия и обнаружение потери сопротивления [81]. ВОД также используются как носимые чувствительные элементы. В работе [82] продемонстрирован датчик на основе ВБР для регистрации дыхания и сердечного ритма. Массив ВБР, встроенный в мягкую полимерную матрицу, использовался для многоточечной регистрации сейсмокардиографических сигналов на грудной клетке [83]. ВОД в носимых устройствах используются для мониторинга движений пальцев и суставов, тактильных воздействий, физиологических параметров и взаимодействия пациента с реабилитационными устройствами, но при этом остаются проблемы, связанные с гибкостью системы, стоимостью и интеграцией в практические устройства [84, 85].

Основные проблемы измерения деформаций волоконно-оптическими датчиками

В большинстве применений ВОД для мониторинга механического состояния объектов оптическое волокно размещается на поверхности объекта контроля. В данном случае актуальными являются вопросы передачи деформаций от исходного материала конструкции к оптическому волокну. Особенно это важно для вариантов, когда ВОД заключен в другие буферные элементы с интерфейсными слоями. В этом случае деформация, регистрируемая датчиком, может отличаться от деформации материала в зоне его установки. Для количественного учета этого эффекта обычно используют коэффициент передачи деформации.

В работе [86] рассмотрена трехслойная модель передачи деформаций, включающая подложку, адгезионный слой и оптическое волокно, закрепленное на поверхности подложки. Для этой модели приведены количественные оценки влияния модуля сдвига адгезионного материала, толщины клеевого слоя и длины приклеенного участка волокна на коэффициент передачи деформации от подложки к оптическому волокну с полиимидным покрытием и записанной ВБР. Показано, что приклеенное волокно с полиимидным покрытием может обеспечивать высокий коэффициент передачи деформаций и достоверно регистрировать деформацию контролируемого объекта. В работах [87, 88] показано, что оптическое волокно с акрилатной оболочкой существенно уступает волокну с полиимидным покрытием по эффективности передачи деформаций.

Численные и экспериментальные исследования коэффициента передачи деформаций для точечных датчиков, приклеенных к поверхности контролируемого материала, представлены в работах [89–91]. С использованием метода конечных элементов выполнен многопараметрический анализ влияния длины и ширины зоны приклеивания, толщины клеевого слоя под волокном и над ним, наличия покрытия оптического волокна и механических свойств материала.

Особую сложность представляет передача деформации от композиционных анизотропных материалов. В работе [92] показано, что деформация, регистрируемая ВБР, отличается от деформации контролируемого материала, причем на коэффициент передачи влияют направление армирования, число слоев и последовательность их укладки, определяющие эффективные механические характеристики материала. Приводится апробация результатов при измерении деформаций в углепластике. ВБР датчики находят применение в элементах внешнего армирования строительных конструкций. В работе [93] рассмотрена схема, в которой оптическое волокно закрепляется на стеклопластиковой ленте, используемой для внешнего армирования железобетонного элемента, и датчик обеспечивает контроль соединения ленты с железобетоном. В результате исследований была определена длина сцепления оптического волокна в зоне ВБР, обеспечивающая необходимую чувствительность датчика. В работе [94] исследовано влияние кратковременной ползучести адгезионного соединения на передачу деформаций от углепластиковой полосы к волоконно-оптическому датчику на основе ВБР, закрепленному на ее поверхности. Рассмотрены эпоксидная смола, цианоакрилатный клей и их комбинация при разных длинах области приклеивания и уровнях длительной нагрузки. Показано, что при длительной постоянной нагрузке недостаточная длина приклеивания приводит к заметному снижению коэффициента передачи деформаций.

Передача деформации может зависеть не только от конструкции датчика и параметров адгезионного слоя, но и от режима нагружения. В работе [95] исследована передача деформаций при циклическом нагружении. Было показано, что коэффициент передачи деформаций при статическом нагружении выше, чем при динамическом режиме деформирования. Для рассматриваемой проблемы представляет интерес работа [96], в которой приведен обзор исследований, связанных с анализом передачи деформаций к ВОД, применяемым в гражданском строительстве.

Внедрение оптических волокон в структуру разных материалов открывает принципиально новые возможности для контроля состояния конструкций как в процессе эксплуатации, так и на этапах изготовления. Тем не менее, при использовании ВОД, встроенных в материал, возникает ряд проблем. Одна из них связана с анализом перераспределения напряженно-деформированного состояния, вызванного встраиванием в материал оптического волокна. В качестве примера можно отметить работу [97], в которой аналитическими методами исследуются напряжения и деформации в области оптического волокна, встроенного в ПКМ.

В ряде работ 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 по данному вопросу [98] рассмотрен алгоритм минимизации полной потенциальной энергии с неизвестным распределением сил в слоях ПКМ и неизвестной длиной смоляного кармана. Результатом расчетов является оценка геометрии смоляного кармана в зависимости от последовательности укладки слоев, давления при изготовлении и диаметра оптического волокна. Результаты численного анализа находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными. В работе [99] 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 [100] дана оценка геометрических размеров смоляного кармана в слоистом композиционном материале с однонаправленным армированием и оптическим волокном, встроенным перпендикулярно направлению армирования. В частности, показано, что длина смоляного кармана может в 16 раз превышать диаметр оптического волокна.

Геометрия смоляного кармана существенно зависит от ориентации оптического волокна относительно направления армирования. В работе [101] приведены экспериментальные данные о форме смоляного кармана при различных углах между оптическим волокном и направлением армирования. Отмечается, что при нулевом угле смоляной карман отсутствует, при угле 90° он близок к классической симметричной форме, а при других углах наблюдаются отличия в размерах смоляного кармана и нарушение его симметрии. В работе [102] исследовано влияние угла ориентации встроенного оптического волокна, температуры и давления предварительного формования ПКМ на геометрию смоляного кармана. Установлено, что длина и площадь смоляного кармана увеличиваются с ростом угла ориентации оптического волокна по синусоидальному закону, тогда как повышение температуры

и давления предварительного формования приводит к их приблизительно линейному уменьшению. В отличие от большинства исследований, посвященных внедрению оптического волокна в композиты с однонаправленным армированием, в работе [103] рассмотрен композит с плетеной структурой армирования. Экспериментальное исследование локальной внутренней структуры материала в окрестности встроенного оптического волокна не выявило формирования смоляного кармана существенных размеров.

В обзоре [104] отмечается, что внедрение оптического волокна в ПКМ неизбежно приводит к концентрации напряжений и деформаций вокруг датчиков. В исследовании [97] 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 напряженного состояния в области оптического волокна является работа [100], в которой рассматривается слоистый композиционный материал с однонаправленным армированием и оптическим волокном, встроенным перпендикулярно армирующим волокнам и окруженным 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 приведенные результаты применимы только для композитов с одним направлением армирования. С точки зрения моделирования, практически идентичная задача с аналогичными выводами рассмотрена в источниках [105, 106] для ПКМ с микрососудными каналами. Отличие от предыдущей работы состоит в том, что вместо оптического волокна имеется полость, незаполненная материалом. В работе [107] численно исследуется напряженное состояние в области внедренного в ПКМ оптического волокна при разных вариантах представления материала и ориентациях армирования смежных с оптическим волокном слоев ПКМ. Показано, что использование слоистой модели представления ПКМ предпочтительно для численной оценки концентрации напряжений в окрестности встроенного оптического волокна.

Представляет интерес сравнительный анализ конечно-элементных результатов и экспериментальных данных на основе муаровой интерферометрии, показывающий количественное согласование между экспериментом и расчетом. Численное моделирование [108] позволило определить оптимальные для датчиков свойства покрытия, минимизирующие уровень концентрации напряжений вокруг датчиков. Примером исследования результатов внедрения оптических волокон в материал является работа [109], в которой дается оценка изменения механических свойств при статическом деформировании углепластикового композита, произведенного по препреговой технологии. Следует отметить работу [110], в которой оценивается влияние встроенных оптических волокон на механические характеристики композита при различных видах механических испытаний: ударных, статических испытаниях на изгиб и усталостных испытаниях. Приведенные данные представляют ценность для интерпретации численных результатов.

При использовании встроенных в материал ВОД возникает ряд проблем, связанных с обеспечением достоверности значений деформаций, вычисленных на основе регистрируемой датчиком физической величины – резонансной длины волны

отраженного сигнала. Одна из проблем 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 сложнонапряженное состояние. Кроме того, для получения достоверных результатов измерений ВОД необходимо обеспечить совпадение деформаций вдоль оптического волокна в материале и в зоне брэгговской решетки.

В работе [111] рассмотрены особенности передачи деформации от материала к встроенному волоконно-оптическому датчику. Приводятся экспериментальные данные, демонстрирующие, что при определенных видах нагружений наблюдаются сильные эффекты двулучепреломления. Показано, что передача деформаций зависит от механических свойств как принимающего материала, так и датчика, а также от схемы укладки композитного материала и положения датчика в определенном слое. В работе [112] представлен обзор проблемы передачи деформаций для распределенных ВОД, внедренных в материал. Обсуждаются механизмы передачи деформаций между конструкцией и оптическим волокном, факторы, влияющие на эффективность передачи деформаций. Авторы подчеркивают, что, в отличие от точечных датчиков, при использовании распределенных ВОД необходимо учитывать характер распределения деформации вдоль длины волокна.

В обзорной работе [113] отмечается, что встроенная ВБР находится в условиях сложнонапряженного состояния и, следовательно, необходимо вводить калибровочные коэффициенты для соответствующих деформаций. Задачи, связанные с калибровкой, подробно рассматриваются в работах [17, 114]. В работе [115] отмечается, что при значительных радиальных деформациях результаты измерений, полученные на основе показаний ВБР, существенно отклоняются от фактических деформаций в материале. Для получения достоверных результатов предлагается калибровать каждый датчик после встраивания в материал или располагать оптическое волокно вдоль максимальных деформаций.

Отраженный оптический спектр ВБР демонстрирует зависимость не только от продольных деформаций, но и от поперечных, а также от распределения деформаций вдоль длины датчика [116, 117]. Известно, что наличие значительных поперечных деформаций приводит к изменению формы спектра и раздвоению резонансного пика. Помимо потенциального источника погрешности измерений, данная особенность может быть использована для одновременного измерения продольных и поперечных деформаций [118, 119].

Одним из способов снижения влияния поперечных деформаций является конструктивная изоляция брэгговской решетки от окружающего материала [120, 121]. В работе [122] описано, как для этой цели использован капилляр в области расположения брэгговской решетки. Такая схема приводит к одноосному напряженному состоянию в области решетки. 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. Работоспособность данного подхода продемонстрирована

при измерении полей деформаций в углепластиковых образцах. В работе [123] показано, как капилляр используется для увеличения температурной чувствительности ВОД. Авторы демонстрируют применимость предложенного подхода на различных ВБР, заключенных в капилляр из цинка с разными материалами связующего. Для обеспечения избирательной чувствительности к различным физическим величинам также разрабатываются гибридные датчики на основе ВБР [124].

В качестве конструктивных решений в работах [125, 126] для получения достоверной информации о продольной и поперечных компонентах тензора деформаций предлагается использование пары микроструктурированных оптических волокон с ВБР, определенным образом ориентированных относительно друг друга. Приводятся аналитическая и численная модели датчика, которые экспериментально апробированы на слоистых композитах. В работе [127] предложено использовать передаточную матрицу для пересчета измеренных деформаций в реальные деформации материала контролируемого объекта. Демонстрируется важность перевода измеренных деформаций в реальные деформации материала контролируемого объекта, которые могут значительно отличаться друг от друга.

Важным фактором, влияющим на форму отраженного спектра ВБР, является наличие градиента деформаций вдоль длины решетки. В работе [128] с использованием 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 работе [129] выполнен анализ эффективности различных алгоритмов определения сдвига отраженного спектра ВБР при разных сценариях изменения его формы. Экспериментальные исследования отраженных спектров ВБР длиной от 2 до 15 мм, записанных с помощью фазовой маски и методом поточечной записи фемтосекундным лазером и находящихся в условиях градиента деформаций, приведены в работах [117, 130]. Авторы делают вывод об увеличении ширины спектра при росте градиента деформаций и возможности снижения влияния градиента деформаций за счет уменьшения длины ВБР. Аналогичная проблема выявлена в работе [131], где при измерении деформаций при изгибе композитного элемента парусной лодки погрешность показаний встроенных ВБР связывается с наличием градиента деформаций вдоль решетки длиной 10 мм.

Градиент деформаций в зоне расположения ВБР может возникать как в результате особенностей геометрии конструкции или наличия дефектов, например, в виде трещин [132], так и вследствие особенностей структуры материала. Особенно ярко влияние структуры материала на возникновение локальных неоднородностей деформаций проявляется для композитных материалов. В работе [116] исследовано влияние неоднородного распределения деформаций в композитном материале с саржевым плетением на отраженный спектр ВБР различной длины. Неоднородное поле деформаций, возникающее вследствие особенностей структуры материала, измерялось с помощью метода цифровой корреляции изображений. Показано, что форма отраженного спектра ВБР длиной 1 мм слабо зависит от градиента деформаций в пределах единичной ячейки материала, однако показания такой решетки имеют локальный характер и не отражают осредненной картины деформаций материала. Увеличение длины ВБР позволяет получить более усредненные значения деформаций материала, но одновременно делает спектральный отклик более чувствительным к неоднородному распределению деформаций вдоль решетки.

Изменение формы отраженного спектра ВБР может приводить к погрешностям при вычислении деформации по регистрируемым спектральным характеристикам [133]. В работе [134] описана методика получения распределения деформаций, основанная на результатах измерения отраженного оптического спектра ВБР. Разработанный подход позволяет рассчитывать влияние пространственно неоднородных полей деформаций на спектры отражения брэгговских решеток. В работе [135] этот метод был проверен экспериментально и усовершенствован для приложений с высокими градиентами деформаций. Влияние градиента деформаций на погрешность их измерения при использовании различных типов распределенных ВОД обсуждается в работах [136, 137].

Использование ВОД на основе ВБР осуществляется в широком диапазоне температур и относительной влажности воздуха, при которых ВОД должны сохранять работоспособность и обеспечивать достоверность и стабильность измерений. В работе [138] показано, что отражательная способность ВБР, записанной в легированном германием оптическом волокне, снижается с увеличением температуры, вплоть до полной потери сигнала от датчика при температуре 850°С. Для оптического волокна без защитной оболочки основное снижение отражательной способности наблюдается после 200°С. Продемонстрирована нелинейная зависимость сдвига резонансной длины волны ВБР, записанной в оптическом волокне с позолоченной оболочкой в диапазоне температур 600-800°С. Нелинейный характер зависимости сдвига резонансной длины волны ВБР от температуры исследуется в работах [139, 140]. В работе [141] описаны эксперименты по регистрации деформаций ВОД на брэгговских решетках при статическом нагружении в течение длительного промежутка времени (от 550 до 900 ч) при различной относительной влажности и температуре окружающей среды. Результаты испытаний показали, что ВОД при различной влажности и температуре, и нагрузках, близких к предельным для испытываемых датчиков, изменяют свои показания в малых пределах. Данный результат свидетельствует о возможности эффективного использования волоконно-оптических датчиков на основе ВБР для проведения долговременных измерений деформаций в диапазоне температур окружающей среды от -40 до + 80°С и относительной влажности воздуха от 5 до 95%.

В работе [142] приводятся исследования применения регенерированных ВБР для высокотемпературных приложений. Анализ экспериментальных результатов по выдержке исследуемых ВБР в течение 9000 часов при температурах от 760 °С до 890 °С показал значительное изменение как отражательной способности ВБР, так и сдвига резонансной длины волны. В работе [143] отмечается, что на стабильность показаний ВБР датчиков также влияет расстояние от анализатора сигналов до брэгговской решетки. Авторы демонстрируют заметный разброс резонансной длины волны и мощности отраженного сигнала при расположении ВБР на расстоянии 25 км от интеррогатора. Для стабилизации показаний предложена волоконно-оптическая схема с использованием кольцевого лазера на легированном эрбием волокне.

Аналогичные исследования на проверку работоспособности ВБР проводились для отрицательных температур, в том числе и криогенных. Так, в работе [144] представлена модель, описывающая поведение оптического волокна, покрытого металлом. Металлическая оболочка служит как для защиты ВБР, так и в качестве исполнительного механизма для повышения чувствительности ВБР к изменению температуры. Работоспособность волоконно-оптических датчиков при криогенных температурах

открывает возможности для таких приложений, как мониторинг хранения сжиженного природного газа [145] с помощью сенсоров на основе ВБР, а так же для разработки сенсорных систем, работающих в космическом пространстве и в криогенных средах с несколькими источниками электромагнитных помех, таких как сверхпроводящие магниты [146–148].

Достижение стабильных и точных измерений деформации с помощью ВОД остается сложной задачей. Так, для распределенных ВОД, сигналы рэлеевского обратного рассеяния по своей природе подвержены влиянию интенсивностных и фазовых шумов, амплитудных искажений и случайных пропаданий сигнала, что усложняет спектральный корреляционный анализ, приводя к выбросам, пропущенным значениям, а также пространственному и временному шуму в данных о распределении деформаций [137, 149]. Даже в средах с минимальными внешними механическими воздействиями эти источники шума могут скрывать едва заметные вариации деформаций или вносить ложные аномалии [150, 151].

Для решения этих проблем применяются различные подходы [152]. Было показано, что оптимизация покрытий волокна и клеевых составов снижает несоответствия при передаче деформаций [153]. Некоторые из эффективных подходов включают специализированное обнаружение выбросов [149], извлечение локальных признаков [154] и вейвлетное шумоподавление [155]. Кроме того, методы, основанные на машинном обучении, продемонстрировали потенциал для снижения шума в реальном времени и обнаружения аномалий [156]. Тем не менее, поиск компромисса между высоким пространственным разрешением, быстрой обработкой и широким диапазоном измерения деформации остается актуальной задачей [150].

Перспективные направления применения волоконно-оптических датчиков

Одним из перспективных направлений является определение модальных характеристик конструкции по результатам измерения динамических деформаций (strain modal testing, SMT). Преимущество такого подхода по сравнению с традиционным модальным анализом, основанным на измерении перемещений или ускорений, связано с тем, что деформации и деформированные формы конструкции более чувствительны к изменению ее жесткости, а следовательно, и к появлению локальных дефектов. В настоящем обзоре рассмотрение динамических измерений ограничено точечными ВОД на основе ВБР и распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния, реализуемыми методом OFDR. При этом следует отметить, что для задач регистрации динамических, вибрационных и акустических воздействий важное место занимают распределенные акустические волоконно-оптические датчики (distributed acoustic sensing, DAS). Подробный анализ принципов работы, областей применения и перспектив развития DAS можно найти в работах [157, 158]. Экспериментальные исследования с использованием ВБР датчиков показывают, что динамические деформации, зарегистрированные встроенными или закрепленными на поверхности датчиками, могут использоваться для определения собственных частот, деформационных форм колебаний и других параметров модального анализа в различных конструкциях [159, 160]. При малых амплитудах эксплуатационных колебаний существенным становится не только качество самого чувствительного элемента, но и способ обработки оптического сигнала. Так, в работе [161] продемонстрирована возможность измерения уровня деформаций менее 1 мкм/м при колебании конструкции, за счет усовершенствованного алгоритма определения сдвига спектра ВБР.

Распределенные методы на основе рэлеевского рассеяния и OFDR позволяют перейти от регистрации динамического отклика в отдельных точках конструкции к анализу пространственного распределения деформаций вдоль измерительной линии. В работе [162] продемонстрирована динамическая система распределенного измерения деформаций на основе рэлеевского рассеяния. Возможности системы показаны на примере регистрации отклика оптического волокна на локальные импульсные нагрузки и гармоническое воздействие. В работе [163] показаны присущие распределенным динамическим системам на основе OFDR компромиссы между пространственным разрешением, длиной измерительной линии, скоростью сканирования и динамическим диапазоном. В прикладной демонстрации на модели лопасти вертолета использование протяженной ВБР длиной 5 м, изготовленной с помощью последовательной записи 10 см решеток, опрашиваемой методом OFDR, позволило получить распределенный деформационный отклик при вибрационном возбуждении, рассчитать прогибы и определить модальные параметры конструкции [164].

Важной задачей динамических измерений с помощью ВОД является восстановление деформированной формы конструкции или поля перемещений по измеренным деформациям. В экспериментах с консольной балкой и пластиной распределенные волоконно-оптические измерения применялись для оценки статической и динамической деформированной формы конструкции, что рассматривается как основа для применения подобных систем в гибких аэрокосмических элементах [165]. В отдельных исследованиях распределенные измерения деформаций рассматриваются в связи с концепцией цифровых двойников: распределенные ВОД в этом случае служат источником экспериментальных данных, на основе которых численная модель конструкции уточняет оценку ее текущей деформированной формы в реальном времени [166].

Отдельное направление связано с использованием ВОД в системах активного управления и диагностики динамического состояния конструкций. В таких задачах деформационный отклик рассматривается не только как результат измерения, но и как входная информация для расчета управляющего воздействия. В частности, массивы ВБР применялись в системах активного подавления вибраций смарт-конструкций [167]. Для распределенных динамических систем актуальны задачи локализации внешних воздействий и сохранения достаточного динамического диапазона измерений. Так, в работе [168] предложен подход, при котором амплитуда вибраций определяется по гармоническим составляющим сигнала распределенного датчика, что позволяет расширить диапазон измерения при больших деформациях.

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. В отличие от традиционных методов контроля, которые обычно позволяют оценивать остаточное напряженно-деформированное состояние после завершения технологического процесса, встроенные ВОД дают возможность регистрировать изменение деформированного состояния непосредственно во время технологического процесса формирования материала. Это особенно важно для полимерных композиционных материалов и изделий, полученных методами аддитивного производства, где остаточные

деформации могут приводить к короблению, отклонению геометрических размеров от проектных значений и ухудшению эксплуатационных характеристик изделия.

В обзорных работах [113, 169] подчеркивается, что встроенные ВБР позволяют измерять внутренние деформации слоистых композитных материалов, однако достоверность таких измерений зависит от условий встраивания, передачи деформаций от матрицы к волокну, перекрестной чувствительности к температуре и деформациям и особенностей спектрального отклика решетки.

В задачах мониторинга отверждения композитов ВОД применяются для регистрации изменений температуры и деформаций на различных стадиях технологического цикла. В ранних работах было показано, что встроенные волоконно-оптические датчики могут использоваться для контроля процесса отверждения композитных материалов и регистрации изменения состояния материала в процессе формирования его структуры [170]. В исследовании [171] предложена схема одновременного измерения температуры и деформации при отверждении слоистых ПКМ с использованием гибридных ВБР/Фабри-Перо датчиков, что позволило разделять температурный и механический вклады в измеряемый сигнал. В работе [172] предложен вариант мониторинга отверждения стеклопластиков. Авторы использовали две связанные ВБР, встроенные в композитный ламинат, для одновременного измерения температуры и деформации во время отверждения композитного материала.

Для слоистых композитов важно учитывать пространственную неоднородность технологических деформаций, поскольку остаточное состояние может различаться по толщине материала, между слоями с разной ориентацией волокон и в локальных зонах концентрации деформаций. В работе [173] описано, как распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния и OFDR были использованы для мониторинга технологических деформаций в процессе отверждения слоистого композитного материала.

В последние годы ВОД начали активно применяться для исследования технологических и остаточных деформаций в изделиях, изготовленных методами аддитивного производства. При 3D-печати остаточные деформации формируются вследствие послойного нагрева и охлаждения, термической усадки, повторного нагрева ранее напечатанных слоев и ограничений со стороны подложки. Для метода послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM) это может приводить к короблению, отрыву от платформы и изменению геометрии изделия. В работе [174] представлено, как для измерения остаточных деформаций в образцах, изготовленных методом послойного наплавления, могут быть использованы распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния, встроенные в процессе печати. Авторы показали возможность регистрации распределения остаточных деформаций внутри 3D-печатных термопластичных образцов и сопоставили результаты измерений с численным моделированием. Другой подход был предложен в исследовании [175], где остаточные напряжения в напечатанных элементах определялись на основе механической модели, в которой используются значения деформаций в подложке, измеряемые ВОД.

При использовании ВОД в аддитивном производстве отдельной проблемой является качество встраивания датчика в печатный материал. Способ размещения волокна, наличие канала, адгезия между покрытием волокна и полимером, локальное нарушение траектории печати и изменение структуры материала вокруг датчика могут

влиять как на сам процесс изготовления, так и на передачу деформаций к чувствительному элементу. Авторами работы [176] исследованы методы встраивания ВБР с полиимидным покрытием в PLA-матрицу при 3D-печати методом послойного наплавления и показана связь между межфазным сцеплением и передачей деформаций.

Заключение

Проведенный обзор демонстрирует, что волоконно-оптические датчики на основе волоконных брэгговских решеток и распределенные датчики на основе рэлеевского рассеяния являются эффективным инструментом измерения деформаций в задачах мониторинга механического состояния конструкций.

Анализ работ показал, что достоверность значений деформаций, измеряемых ВОД, определяется не только характеристиками датчика и измерительной системы, но и условиями его размещения в материале или на поверхности конструкции. Наибольшее влияние оказывают передача деформаций от контролируемого объекта к оптическому волокну, температурная чувствительность, поперечные деформации, сложнонапряженное состояние в области датчика, градиенты деформаций и особенности обработки оптического сигнала.

Наиболее сложной остается интерпретация показаний, встроенных в материал ВОД, поскольку внедрение оптического волокна может изменять локальную структуру и напряженно-деформированное состояние материала.

Перспективы дальнейшего развития ВОД связаны с повышением достоверности измерений в неоднородных и нестационарных полях деформаций, совершенствованием методов температурной компенсации, развитием распределенных динамических измерений, интеграцией данных в цифровые двойники и использованием ВОД для контроля состояния материалов непосредственно в процессе изготовления.

Библиографический список

1. *Hecht J.* Laser pioneers. – Rev. ed. – Boston San Diego New York [etc.]: 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. – № 7. – P. 1151–1158. https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189
3. *Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D.* Radiation losses in glass optical waveguides // Appl. Phys. Lett. – 1970. – Vol. 17. – № 10. – P. 423–425. https://doi.org/10.1063/1.1653255
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. – № 10. – P. 647–649. https://doi.org/10.1063/1.89881
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. – № 15. – P. 823. https://doi.org/10.1364/OL.14.000823
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. *Gafsi R., El-Sherif M.A.* Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings // Opt. Fiber Technol. – 2000. – Vol. 6. – № 3. – P. 299–323. https://doi.org/10.1006/ofte.2000.0333

10. *Bertholds A., Dändliker R.* Determination of Individual Strain-Optic Coefficients in Single-Mode Optical Fibers // Light. Technol. J. Of. – 1988. – Vol. 6. – P. 17–20. https://doi.org/10.1109/50.3956
11. *Rego G.M.* Temperature Dependence of the Thermo-Optic Coefficient of GeO2-Doped Silica Glass Fiber // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 15. – P. 4857. https://doi.org/10.3390/s24154857
12. *Othonos A., Kalli K., Pureur D., Mugnier A.* Fibre Bragg Gratings // Wavelength Filters in Fibre Optics. / ed. Venghaus H. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – Vol. 123. – P. 189–269. https://doi.org/10.1007/3-540-31770-8_6
13. *Pendão C., Silva I.* Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 19. – P. 7554. https://doi.org/10.3390/s22197554
14. *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. – № 2. – P. 666. https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666
15. *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. – № 4. – P. 041302. https://doi.org/10.1063/1.5113955
16. *Turov A., Fotiadi A., Korobko D., Panyaev I., Belokrylov M., Barkov F., Konstantinov Y., Kambur D., Sakhabutdinov A., Qaid M.* A Review of Multiparameter Fiber-Optic Distributed Sensing Techniques for Simultaneous Measurement of Temperature, Strain, and Environmental Effects // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 23. – P. 7225. https://doi.org/10.3390/s25237225
17. *Di Sante R.* Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – № 8. – P. 18666–18713. https://doi.org/10.3390/s150818666
18. *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. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.471
19. *Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A.* Measurement of Gradient Strain Fields with Fiber-Optic Sensors // Sensors. – 2022. – Vol. 23. – № 1. – P. 410. https://doi.org/10.3390/s23010410
20. *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. – № 12. – P. 125102. https://doi.org/10.1088/1361-6501/b3530
21. *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. – № 8. – P. 868. https://doi.org/10.3390/photonics10080868
22. *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. – № 12. – P. 3811. https://doi.org/10.3390/s24123811
23. *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. – № 9. – P. 3115. https://doi.org/10.3390/s18093115
24. *Takeda N.* Recent Development of Structural Health Monitoring Technologies for Aircraft Composite Structures // Proc. 26th Int. Congr. Aeronaut. Sci. – 2008. – P. 1–12.
25. *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. – № 3. – P. 246–251. https://doi.org/10.1134/S1995421211030063
26. *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. https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.003
27. *Kobayashi M., Ogino H., Burman M., Wada D., Igawa H., Murayama H.* Shape sensing for CFRP and aluminum honeycomb sandwich panel using inverse finite element method with distributed fiber-optic sensors // Compos. Struct. – 2023. – Vol. 308. – P. 116648. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116648

28. *Rocha H., Semprimoschnig C., Nunes J.P.* Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review // Eng. Struct. – 2021. – Vol. 237. – P. 112231. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112231

29. *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. – № 4. – P. 1094. https://doi.org/10.3390/s18041094

30. *Schenato L.* A Review of Distributed Fibre Optic Sensors for Geo-Hydrological Applications // Appl. Sci. – 2017. – Vol. 7. – № 9. – P. 896. https://doi.org/10.3390/app7090896

31. *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. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102127

32. *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. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107449

33. *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. – № 11. – P. 2491. https://doi.org/10.3390/electronics12112491

34. *Barrias A., Casas J., Villalba S.* A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications // Sensors. – 2016. – Vol. 16. – № 5. – P. 748. https://doi.org/10.3390/s16050748

35. *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. – № 5. – P. 1818. https://doi.org/10.3390/s21051818

36. *Minardo A., Bernini R., Berruti G.M., Breglio G., Bruno F.A., Buontempo S., Campopiano S., Catalano E., Consales M., Coscetta A., Cusano A., Cutolo M.A., Di Palma P., Esposito F., Fienga F., Giordano M., Iele A., Iadicicco A., Irace A., Janneh M., Laudati A., Leone M., Maresca L., Marrazzo V.R., Pisco M., Quero G., Riccio M., Srivastava A., Vaiano P., Zeni L., Cutolo A.* Innovative Photonic Sensors for Safety and Security, Part I: Fundamentals, Infrastructural and Ground Transportations // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 5. – P. 2558. https://doi.org/10.3390/s23052558

37. *Fedotov M.Yu., Budadin O.N., Kozel'Skaya S.O., Ovchinnikov I.G., Shelemba I.S.* Strengthening by composite materials and optical monitoring of the reliability of operation of building structures (Review) // Compos. Mater. Constr. – 2022. – № 1. – P. 57–67. https://doi.org/10.52190/2073-2562_2022_1_57

38. *Rodriguez-Ramirez D.A., Martinez-Angulo J.R., Filoteo-Razo J.D., Elizondo-Leal J.C., Diaz-Manriquez A., Jauregui-Vazquez D., Lauterio-Cruz J.P., Saldivar-Alonso V.P.* Review of Optical Fiber Sensors: Principles, Classifications and Applications in Emerging Technologies // Photonics. – 2025. – Vol. 13. – № 1. – P. 40. https://doi.org/10.3390/photonics13010040

39. *Cutolo A., Bernini R., Berruti G.M., Breglio G., Bruno F.A., Buontempo S., Catalano E., Consales M., Coscetta A., Cusano A., Cutolo M.A., Di Palma P., Esposito F., Fienga F., Giordano M., Iele A., Iadicicco A., Irace A., Janneh M., Laudati A., Leone M., Maresca L., Marrazzo V.R., Minardo A., Pisco M., Quero G., Riccio M., Srivastava A., Vaiano P., Zeni L., Campopiano S.* Innovative Photonic Sensors for Safety and Security, Part II: Aerospace and Submarine Applications // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 5. – P. 2417. https://doi.org/10.3390/s23052417

40. *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. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.08.023

41. *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. – № 10. – P. 2239. https://doi.org/10.3390/s19102239

42. *Li H., LianQing Z., Gaungkai S., MingLi 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. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.067

43. *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. – № 4. – P. 1337–1351. https://doi.org/10.1177/1475921719843772

44. *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. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100190

45. *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. – № 3. – P. 18. https://doi.org/10.3390/aerospace3030018

46. *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. – № 1. – P. 147–155. https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/1/317

47. *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. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106526

48. *Wada D., Igawa H., Tamayama M., Kasai T., Arizono H., Murayama H., Shiotsubo K.* Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system // Smart Mater. Struct. – 2018. – Vol. 27. – № 2. – P. 025014. https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa588

49. *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. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.050

50. *Качура С.М., Постнов В.И.* Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 5(77). – С. 52–61. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61

51. *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. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114025

52. *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. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.019

53. *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. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.057

54. *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. – № 1. – P. 012030. https://doi.org/10.1088/1757-899X/581/1/012030

55. *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. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.042

56. *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 // Materials. – 2020. – Vol. 13. – № 10. – P. 2249. https://doi.org/10.3390/ma13102249

57. *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. https://doi.org/10.1155/2014/109403

58. *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. https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.027

59. *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. – № 3–4. – P. 177–186. https://doi.org/10.3233/JAE-2006-736

60. *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. – № 12. – P. 125014. https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/12/125014

61. *Ma J., Pei H., Zhu H., Shi B., Yin J.* A review of previous studies on the applications of fiber optic sensing technologies in geotechnical monitoring // Rock Mech. Bull. – 2023. – Vol. 2. – № 1. – P. 100021. https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100021

62. *Johnson Singh M., Choudhary S., Chen W.-B., Wu P.-C., Kumar Goyal M., Rajput A., Borana L.* Applications of fibre Bragg grating sensors for monitoring geotechnical structures: A comprehensive review // Measurement. – 2023. – Vol. 218. – P. 113171. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113171

63. *Huang A.-B., Wang C.-C., Lee J.-T., Ho Y.-T.* Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring // J. Rock Mech. Geotech. Eng. – 2016. – Vol. 8. – № 4. – P. 513–520. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.01.007

64. *Zhang L., Shi B., Zeni L., Minardo A., Zhu H., Jia L.* An Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Slope Deformation Studies in Geotechnical Centrifuges // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – № 7. – P. 1591. https://doi.org/10.3390/s19071591

65. *Schenato L., Palmieri L., Camporese M., Bersan S., Cola S., Pasuto A., Galtarossa A., Salandin P., Simonini P.* Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 14686. https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1

66. *Chen Y., Tian Z.-G., Huang M.-L., Gao Y.-L., Wu Y.-J., Yan G.-H.* Field application of BOFDA-based distributed fiber optic sensing in static load testing of cast-in-place pile foundations // Front. Built Environ. – 2025. – Vol. 11. – P. 1–23. https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1700987

67. *Румановский И.Г.* Применение технологии распределенных оптоволоконных сенсоров для мониторинга геотехнических объектов // Вестник ТОГУ. – 2025. – № 4(79). – С. 59–78. https://doi.org/10.38161/1996-3440-2025-4-59-78

68. *Gao Y., Zhu H., Qiao L., Liu X., Wei C., Zhang W.* Feasibility study on sinkhole monitoring with fiber optic strain sensing nerves // J. Rock Mech. Geotech. Eng. – 2023. – Vol. 15. – № 11. – P. 3059–3070. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.026

69. *Anjana K., Herath M., Epaarachchi J.* Optical fibre sensors for geohazard monitoring – A review // Measurement. – 2024. – Vol. 235. – P. 114846. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114846

70. *Ye X.W., Su Y.H., Han J.P.* Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review // Sci. World J. – 2014. – Vol. 2014. – № 1. – P. 652329. https://doi.org/10.1155/2014/652329

71. *Wu T., Liu G., Fu S., Xing F.* Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – № 16. – P. 4517. https://doi.org/10.3390/s20164517

72. *Kishida K., Imai M., Kawabata J., Guzik A.* Distributed Optical Fiber Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 12. – P. 4368. https://doi.org/10.3390/s22124368

73. *Gómez J., Casas J.R., Villalba S.* Structural Health Monitoring with Distributed Optical Fiber Sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity // Autom. Constr. – 2020. – Vol. 117. – P. 103261. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103261

74. *Wheeler L.N., Pannese E., Hoult N.A., Take W.A., Le H.* Measurement of distributed dynamic rail strains using a Rayleigh backscatter based fiber optic sensor: Lab and field evaluation // Transp. Geotech. – 2018. – Vol. 14. – P. 70–80. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.10.002

75. *Bochenska M., Goldyn M., Zdanowicz K.* Distributed Fiber Optic Sensing in Bridge Structural Health Monitoring: Insights from Real-Life Implementations in Germany // E-J. Nondestruct. Test. – 2025. – Vol. 30. – № 10. – P. 1–10. https://doi.org/10.58286/31694

76. *Al-Fakih E., Abu Osman N.A., Mahamd Adikan F.R.* The Use of Fiber Bragg Grating Sensors in Biomechanics and Rehabilitation Applications: The State-of-the-Art and Ongoing Research Topics // Sensors. – 2012. – Vol. 12. – № 10. – P. 12890–12926. https://doi.org/10.3390/s121012890

77. *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. – № 4. – P. 2210–2221. https://doi.org/10.1364/BOE.8.002210

78. *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. – № 12. – P. 2137–2145. https://doi.org/10.1007/s11548-019-02059-0

79. *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. – № 1. – P. 107–118. https://doi.org/10.1007/s40436-019-00284-z

80. *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. – № 11. – P. 446. https://doi.org/10.3390/bios11110446

81. *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. – № 16. – P. 5329. https://doi.org/10.3390/s21165329

82. *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. – № 3. – P. 470. https://doi.org/10.3390/s19030470

83. *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. – № 11. – P. 21162. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00574-2

84. *Peng N., Meng W., Wei Q., Ai Q., Liu Q., Xie S.* Wearable Optical Fiber Sensors for Biomechanical Measurement in Medical Rehabilitation: A Review // IEEE Sens. J. – 2023. – Vol. 23. – № 12. – P. 12455–12469. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3273536

85. *Li X., Li Y., Wei H., Wang C., Liu B.* A Review of Wearable Optical Fiber Sensors for Rehabilitation Monitoring // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 11. – P. 3602. https://doi.org/10.3390/s24113602

86. *Sun Y., Liu J., Wang Y., Zhang Q., Duan J., Zhang Z., Huang X., You Z.* Principles and Application of Polyimide Fiber Bragg Gratings for Surface Strain Measurement // Appl. Sci. – 2017. – Vol. 7. – № 10. – P. 995. https://doi.org/10.3390/app7100995

87. *Landreau C., Morana A., Ponthus N., Le Gall T., Charvin J., Girard S., Marin E*. Influence of Adhesive Bonding on the Dynamic and Static Strain Transfers of Fibre Optic Sensors // Photonics. – 2023. – Vol. 10. – № 9. – P. 996. https://doi.org/10.3390/photonics10090996

88. *Chapeleau X., Bassil A.* A General Solution to Determine Strain Profile in the Core of Distributed Fiber Optic Sensors under Any Arbitrary Strain Fields // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 16. – P. 5423. https://doi.org/10.3390/s21165423

89. *Floris I., Sangiorgio V., Adam J.M., Uva G., Rapido M., Calderón P.A., Madrigal J.* Effects of bonding on the performance of optical fiber strain sensors // Struct. Control Health Monit. – 2021. – Vol. 28. – № 9. – P. e2782. https://doi.org/10.1002/stc.2782

90. *Wan K.T., Leung C.K.Y., Olson N.G.* Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors // Smart Mater. Struct. – 2008. – Vol. 17. – № 3. – P. 035037. https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035037

91. *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. – № 12. – P. e3142. https://doi.org/10.1002/stc.3142

92. *Wang Z., Li H., Zhang L., Xue J.* Strain Transfer Characteristic of a Fiber Bragg Grating Sensor Bonded to the Surface of Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates // Appl. Sci. – 2018. – Vol. 8. – № 7. – P. 1171. https://doi.org/10.3390/app8071171

93. *Seo S.-Y., Park J.-H., Yun H.-D., Kim K.-S., Lee G.-C., Hong S.* Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor Externally Bonded to FRP Strip for Structural Monitoring after Reinforcement // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 16. – P. 4382. https://doi.org/10.3390/ma14164382

94. *Tran H.V., Seo S.-Y.* Short-Term Creep Effect on Strain Transfer from Fiber-Reinforced Polymer Strips to Fiber Bragg Grating-Optical Fiber Sensors // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 3. – P. 1628. https://doi.org/10.3390/s23031628

95. *Wang H.P., Xiang P., Li X.* Theoretical Analysis on Strain Transfer Error of FBG Sensors Attached on Steel Structures Subjected to Fatigue Load // Strain. – 2016. – Vol. 52. – № 6. – P. 522–530. https://doi.org/10.1111/str.12195

96. *Wang H., Xiang P., Jiang L.* Strain transfer theory of industrialized optical fiber-based sensors in civil engineering: A review on measurement accuracy, design and calibration // Sens. Actuators Phys. – 2019. – Vol. 285. – P. 414–426. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.019

97. *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.

98. *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. – № 2. – P. 101–107. https://doi.org/10.1088/0964-1726/1/2/001

99. *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. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.003

100. *Shivakumar K., Bhargava A.* Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor // J. Compos. Mater. – 2005. – Vol. 39. – № 9. – P. 777–798. https://doi.org/10.1177/0021998305048156

101. *Shivakumar K., Emmanwori L.* Mechanics of Failure of Composite Laminates with an Embedded Fiber Optic Sensor // J. Compos. Mater. – 2004. – Vol. 38. – № 8. – P. 669–680. https://doi.org/10.1177/0021998304042393

102. *Zhao Z., Zhang K., Liu C., Cheng H., Zou P., Feng M., Xiao J., Liang B.* Influence of processing parameters on the resin pocket geometry of smart composites embedded with Fiber Bragg Grating sensor and its fast prediction // Polym. Compos. – 2024. – Vol. 45. – P. 6214–6225. https://doi.org/10.1002/pc.28190

103. *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. – № 51. – P. 225–235. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.51.18

104. *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. – № 6. – P. 925–939. https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/6/314

105. *Al-Shawk A., Tanabi H., Sabuncuoglu B.* Investigation of stress distributions in the resin rich region and failure behavior in glass fiber composites with microvascular channels under tensile loading // Compos. Struct. – 2018. – Vol. 192. – P. 101–114. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.061

106. *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. – № 11. – P. 1886–1894. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.005

107. *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. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111844

108. *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. – № 11. – P. 115003. https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/115003

109. *Hadzic R., John S., Herszberg I.* Structural integrity analysis of embedded optical fibres in composite structures // Compos. Struct. – 1999. – Vol. 47. – № 1–4. – P. 759–765. https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00050-7

110. *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. – № 14. – P. 1261–1281. https://doi.org/10.1177/0021998305050423

111. *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. – № 10. – P. 105017. https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/10/105017

112. *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. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104262

113. *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. https://doi.org/10.3390/s110100384

114. *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. – № 1. – P. 150–164. https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.008

115. *Fan Y., Kahrizi M.* Characterization of a FBG strain gage array embedded in composite structure // Sens. Actuators Phys. – 2005. – Vol. 121. – № 2. – P. 297–305. https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.01.021

116. *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. – № 7. – P. 893–908. https://doi.org/10.1177/0021998318793183

117. *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. – № 8. – P. 712–718. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.006

118. *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. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.008

119. *Udd E.* Review of multi-parameter fiber grating sensors // Fiber Optic Sensors and Applications V / ed. Udd E. – Bellingham, WA: SPIE, 2007. – Vol. 6770. – P. 677002. https://doi.org/10.1117/12.753525

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. – № 49. – P. 177–189. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.19

121. *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. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.049

122. *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. – № 10. – P. 105018. https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/10/105018

123. *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. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.07.068

124. *Леонович Г.И., Олешкевич С.В.* Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук. – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 1340–1345.

125. *Sonnenfeld C., Luyckx G., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S., Gomina M., Chah K., Mergo P., Urbanczyk W., Thienpont H., Degrieck J., Berghmans F.* Microstructured optical fiber Bragg grating as an internal three-dimensional strain sensor for composite laminates // Smart Mater. Struct. – 2015. – Vol. 24. – № 5. – P. 055003. https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055003

126. *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. – № 3. – P. 2566–2579. https://doi.org/10.3390/s110302566

127. *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.

128. *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. – № 5. – P. 1012–1018. https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2042954

129. *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. – № 12. – P. 24258–24277. https://doi.org/10.3390/s141224258

130. *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. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.076

131. *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. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.019

132. *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. – № 5. – P. 1056. https://doi.org/10.3390/s19051056

133. *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. – № 13. – P. 1934–1941. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.07.002

134. *Huang S., Ohn M.M., Measures R.M.* Phase-based Bragg intragrating distributed strain sensor // Appl. Opt. – 1996. – Vol. 35. – № 7. – P. 1135. https://doi.org/10.1364/AO.35.001135

135. *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. – № 1. – P. 19–28. https://doi.org/10.1007/BF02323100

136. *Serovaev G.S., Galkina E.B.* Strain Measurement in Heterogeneous Materials Using Distributed Fiber-Optic Sensors // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2025. – Vol. 89. – № S1. – P. S88–S94. https://doi.org/10.1134/S1062873825713959

137. *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. – № 8. – P. e2768. https://doi.org/10.1002/stc.2768

138. *Wu W., Liu X.* Investigation on high temperature characteristics of FBG sensors // Optik. – 2015. – Vol. 126. – № 20. – P. 2411–2413. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.009

139. *Shestakov A., Shardakov I., Glot I., Yepin V., Gusev G., Tsvetkov R.* Estimation of the nonlinear dependence of the indications of a fiber Bragg grating on temperature and strain from experimental data // Frat. Ed Integrità Strutt. – 2022. – Vol. 16. – № 62. – P. 561–572. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.38

140. *Aniskovich V.A., Budadin O.N., Kozelskaya S.O., Kutyurin Yu.G., Rykov A.N.* Identification of temperature sensitivity detector on fiber bragg grating (FBG) sensor // Kontrol Diagn. – 2022. – № 287. – P. 26–33. https://doi.org/10.14489/td.2022.05.pp.026-033

141. *Серовaев 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. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.4.10

142. *Laffont G., Cotillard R., Ferdinand P.* 9000 hours-long high temperature annealing of regenerated fiber Bragg gratings // Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors / ed. Jaroszewicz L.R. – Bellingham, WA: SPIE, 2013. – Vol. 8794. – P. 87941X. https://doi.org/10.1117/12.2025838

143. *Chang Y.-J., Yeh C.-H., Chow C.-W.* Reliability of stable fiber Bragg grating sensor system for monitoring temperature and strain individually // Meas. Sci. Technol. – 2019. – Vol. 30. – P. 105108. https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab2290

144. *Vendittozzi C., Felli F., Lupi C.* Modeling FBG sensors sensitivity from cryogenic temperatures to room temperature as a function of metal coating thickness // Opt. Fiber Technol. – 2018. – Vol. 42. – P. 84–91. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.02.017

145. *Hong W., Shen S., Wang Z., Wang Z., Cai W.* A cryogenic sensor based on fiber Bragg grating for storage monitoring of liquefied natural gas // Cryogenics. – 2019. – Vol. 97. – P. 7–12. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.11.001

146. *Rajinikumar R., Narayankhedkar K.G., Krieg G., Suber M., Nyilas A., Weiss K.P.* Fiber Bragg Gratings for Sensing Temperature and Stress in Superconducting Coils // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2006. – Vol. 6. – № 6. – P. 0600310. https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864332

147. *Baxter S., Lakrimi M., Thomas A.M., Gao Y., Blakes H., Gibbens P., Looi M.* Validation of a novel fiber optic strain gauge in a cryogenic and high magnetic field environment // Cryogenics. – 2010. – Vol. 50. – № 10. – P. 700–707. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.07.005

148. *Chiuchiolo A., Bajko M., Perez J.C., Bajas H., Consales M., Giordano M., Breglio G., Cusano A.* Fiber Bragg Grating Cryosensors for Superconducting Accelerator Magnets // IEEE Photonics J. – 2014. – Vol. 6. – № 6. – P. 0600310. https://doi.org/10.1109/jphot.2014.2343994

149. *Richter B., Ulbrich L., Herbers M., Marx S.* Advances in Data Pre-Processing Methods for Distributed Fiber Optic Strain Sensing // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 23. – P. 7454. https://doi.org/10.3390/s24237454

150. *Qu S., Wang Z., Qin Z., Xu Y., Cong Z., Liu Z.* Internet of Things Infrastructure Based on Fast, High Spatial Resolution, and Wide Measurement Range Distributed Optic-Fiber Sensors // IEEE Internet Things J. – 2022. – Vol. 9. – № 4. – P. 2882–2889. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3094272

151. *Matveenko V.P., Serovaev G.S., Galkina E.B., Koniukhov V.A.* Statistical analysis of noise in distributed fiber-optic sensor strain measurements // Procedia Struct. Integr. – 2025. – Vol. 72. – P. 229–234. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.097

152. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Claude D., Kambur D.A., Belokrylov M.E., Turov A.T., Korobko D.A.* Newest Methods and Approaches to Enhance the Performance of Optical Frequency-Domain Reflectometers // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 16. – P. 5432. https://doi.org/10.3390/s24165432

153. *Du W., Zheng X., Shi B., Sun M., Wu H., Ni W., Zheng Z., Niu M.* Strain Transfer Mechanism in Surface-Bonded Distributed Fiber Optic Sensors under Different Strain Fields // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 15. – P. 6863. https://doi.org/10.3390/s23156863

154. *Lv Y., Xiao X., Li H., Ai K., Yan Z., Sun Q.* Strain measurement with adaptive local feature extraction method based on special fiber OFDR system // Opt. Express. – 2024. – Vol. 32. – № 4. – P. 5043. https://doi.org/10.1364/OE.515302

155. *Li P., Fu C., Du B., He J., Zhong H., Du C., Wang L., Wang Y.* High-Spatial-Resolution Strain Sensor Based on Distance Compensation and Image Wavelet Denoising Method in OFDR // J. Light. Technol. – 2021. – Vol. 39. – № 19. – P. 6334–6339. https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3095851

156. *Karapanagiotis C., Hicke K., Krebber K.* A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring // Tm - Tech. Mess. – 2023. – Vol. 90. – № 3. – P. 177–195. https://doi.org/10.1515/teme-2022-0098

157. *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. – № 3. – P. 1033. https://doi.org/10.3390/s22031033

158. *Чугаев А.В., Санфиров И.А., Кузнецов А.И., Богданов Р.А.* Скважинный сейсморазведочный мониторинг породного массива с применением оптоволоконных распределенных акустических датчиков // Наука и технологические разработки. – 2023. – Т. 102. – № 4. – P. 50–63. https://doi.org/10.21455/std2023.4-3

159. *Lamberti A., Chiesura G., Luyckx G., Degrieck J., Kaufmann M., Vanlanduit S.* Dynamic Strain Measurements on Automotive and Aeronautic Composite Components by Means of Embedded Fiber Bragg Grating Sensors // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – № 10. – P. 27174–27200. https://doi.org/10.3390/s151027174

160. *Huang J., Zhou Z., Zhang L., Chen J., Ji C., Pham D.* Strain Modal Analysis of Small and Light Pipes Using Distributed Fibre Bragg Grating Sensors // Sensors. – 2016. – Vol. 16. – № 10. – P. 1583. https://doi.org/10.3390/s16101583

161. *Anastasopoulos D., Moretti P., Geernaert T., De Pauw B., Nawrot U., De Roeck G., Berghmans F., Reynders E.* Identification of modal strains using sub-microstrain FBG data and a novel wavelength-shift detection algorithm // Mech. Syst. Signal Process. – 2017. – Vol. 86. – P. 58–74. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.09.038

162. *Arbel D., Eyal A.* Dynamic optical frequency domain reflectometry // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22. – № 8. – P. 8823. https://doi.org/10.1364/OE.22.008823

163. *Kreger S.T., Klein J.W., Rahim N.A.A., Bos J.J.* Distributed Rayleigh scatter dynamic strain sensing above the scan rate with optical frequency domain reflectometry // Fiber Optic Sensors and Applications XII / ed. Pickrell G., Udd E., Du H.H. – Bellingham, WA: SPIE, 2015. – Vol. 9480. – P. 948006. https://doi.org/10.1117/12.2177578

164. *Wada D., Igawa H., Kasai T.* Vibration monitoring of a helicopter blade model using the optical fiber distributed strain sensing technique // Appl. Opt. – 2016. – Vol. 55. – № 25. – P. 6953. https://doi.org/10.1364/AO.55.006953

165. *Heaney P.S., Ivanco T.G., Bilgen O*. Distributed Sensing of a Cantilever Beam and Plate using a Fiber Optic Sensing System // 2018 Applied Aerodynamics Conference. – Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018. https://doi.org/10.2514/6.2018-3482

166. *Li Y., Pan Y., Sharif-Khodaei Z.* Real-time deformation digital twin of composite plates via distributed fiber optic sensing // Adv. Eng. Inform. – 2026. – Vol. 69. – P. 103992. https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103992

167. *Cazzulani G., Cinquemani S., Comolli L., Gardella A., Resta F.* Vibration control of smart structures using an array of Fiber Bragg Grating sensors // Mechatronics. – 2014. – Vol. 24. – № 4. – P. 345–353. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.07.014

168. *Chen M.* Distributed vibration sensor with a high strain dynamic range by harmonics analysis // Opt. Laser Technol. – 2023. – Vol. 159. – P. 109006. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.109006

169. *Kinet D., Mégret P., Goossen K.W., Qiu L., Heider D., Caucheteur C.* Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions // Sensors. – 2014. – Vol. 14. – № 4. – P. 7394–7419. https://doi.org/10.3390/s140407394

170. *Murukeshan V.M., Chan P.Y., Ong L.S., Seah L.K.* Cure monitoring of smart composites using Fiber Bragg Grating based embedded sensors // Sens. Actuators Phys. – 2000. – Vol. 79. – № 2. – P. 153–161. https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00266-6

171. *Kang H.-K., Kang D.-H., Bang H.-J., Hong C.-S., Kim C.-G.* Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors // Smart Mater. Struct. – 2002. – Vol. 11. – P. 279–287. https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/2/311

172. *Montanini R., D'Acquisto L.* Simultaneous measurement of temperature and strain in glass fiber/epoxy composites by embedded fiber optic sensors: I. Cure monitoring // Smart Mater. Struct. – 2007. – Vol. 16. – P. 1718–1726. https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/026

173. *Tsai J.-T., Dustin J.S., Mansson J.-A.* Cure strain monitoring in composite laminates with distributed optical sensor // Compos. Part Appl. Sci. Manuf. – 2019. – Vol. 125. – P. 105503. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105503

174. *Wang S., Lasn K., Elverum C.W., Wan D., Echtermeyer A.* Novel in-situ residual strain measurements in additive manufacturing specimens by using the Optical Backscatter Reflectometry // Addit. Manuf. – 2020. – Vol. 32. – P. 101040. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101040

175. *Chen R., He W., Xie H., Liu S.* Monitoring the strain and stress in FDM printed lamellae by using Fiber Bragg Grating sensors // Polym. Test. – 2021. – Vol. 93. – P. 106944. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106944

176. *Mashayekhi F., Bardon J., Koutsawa Y., Westermann S., Addiego F.* Methods for embedding fiber Bragg grating sensors during material extrusion: Relationship between the interfacial bonding and strain transfer // Addit. Manuf. – 2023. – Vol. 68. – P. 103497. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103497

Благодарности:
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).

Для цитирования:
Матвеенко В.П., Сероваев Г.С. Измерение деформаций волоконно-оптическими датчиками. Обзор // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 5–32. https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.1

Сведения об авторах:
Матвеенко Валерий Павлович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; научный руководитель Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ПФИЦ УрО РАН»), 614000, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13А; e-mail: mvp@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-2787-6558
Сероваев Григорий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: serovaev@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-0312-8088

STRAIN MEASUREMENT USING FIBER-OPTIC SENSORS: A REVIEW

Matveenko V.P., Serovaev G.S.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm

The paper presents a review of research related to strain measurement using fiber-optic sensors (FOS). Single-point FOS based on fiber Bragg gratings and distributed FOS based on Rayleigh scattering are considered. A brief history of FOS development is presented, along with an overview of basic operating principles of point and distributed sensors. Applications of FOS in aircraft structures, geotechnical monitoring, civil infrastructure, medicine, and biomechanics are discussed. Particular attention is paid to factors that determine the reliability of strain values measured by point and distributed FOS: strain transfer from the measured object to the optical fiber region where measurements are performed; changes in the structure and stress-strain state of the material after FOS embedding; accounting for the complex stress state in the optical fiber when calculating strain from physical quantities recorded by the sensor; the influence of temperature and humidity; and the influence of strain gradients. The paper also analyzes the use of FOS embedded in materials to measure process-induced and residual strains in polymer and composite materials manufactured via various chemical molding and additive manufacturing technologies. It is shown that correct interpretation of sensor readings requires consideration of the physical principles of measurement, bonding or embedding conditions, material properties, and data processing algorithms. Promising areas for the application of FOS are considered.

Keywords: *strain measurement, fiber-optic sensors, fiber Bragg grating, optical frequency domain reflectometry, point sensors, distributed sensors, polymer composite material*

Поступила в редакцию: 13.07.2026
Принята к публикации: 21.07.2026