



Review Article

Received: October 12, 2023

Accepted: November 21, 2023

Published: December 1, 2023

ISSN 2658-5553

Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: A Review

Kordas, George^{1*} Liokumovich, Leonid Borisovich^{1*} Ushakov, Nikolai Aleksandrovich^{1*}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; gckordas@gmail.com (K.G.); Leonid@spbstu.ru (L.L.B.); n.ushakoff@spbstu.ru (U.N.A.)
Correspondence:* email gckordas@gmail.com;

Keywords:

Composite materials; Composite structures; Damage detection; Distributed optical fiber sensors; Fiber optic; Health monitoring; Optical fibre sensors; Reinforced concrete; Sensors; Strain measurement; Structural analysis; Structural health monitoring

Abstract:

Recent advances in integrated fiber optic sensors for structural health monitoring are examined. The review covers implementing various detection mechanisms, including fiber Bragg gratings, Brillouin optical time domain, and Raman spectroscopy. The challenges and opportunities associated with integrating fiber optic sensors into various structural materials and emerging trends in measurement technologies and data analysis for structural health monitoring applications are summarized. The following conclusions are drawn. Fiber optic sensors offer several advantages over traditional nondestructive testing methods, including resistance to electromagnetic interference, small size, high sensitivity, and the ability to measure over long distances. Integrating fiber optic sensors into various structural materials, including composites, concrete structures, and textiles, provides effective monitoring and a broader range of capabilities than traditional structural health monitoring tools. It is necessary to continue research in materials science, measurement technologies, and data processing to improve the accuracy and reliability of measurements and reduce the cost of sensors.

1 Introduction

Мониторинг структурного состояния (Structural Health Monitoring, SHM) стал важнейшим инструментом для оценки целостности и работоспособности критически важной инфраструктурных объектов, зданий, сооружений и других объектов, от давно эксплуатируемых мостов и зданий до космических кораблей и морских платформ [1], [2], [3]. Эволюция технологий мониторинга структурного состояния вызвана пересечением различных научных областей: измерительной техники, материаловедения, строительных технологий. Конвергенция этих областей стимулировала появление инновационных решений для мониторинга в реальном времени [4].

Системы мониторинга структурного состояния используют сеть датчиков для постоянного мониторинга параметров конструкции, таких как деформация, температура, трещинообразование и вибрация, что позволяет заблаговременно обнаруживать потенциальные повреждения и износ. При применении самовосстанавливающихся материалов и технологий с самовосстановлением [5], [6], [7], [8], [9], [10] системы мониторинга структурного состояния могут позволить вести контроль за процессом самовосстановления в лабораторных исследованиях и *in situ*.

Среди различных измерительных технологий, используемых в мониторинге структурного состояния, волоконно-оптические датчики получили значительную популярность благодаря



присущим им преимуществам, включая устойчивость к электромагнитным помехам, небольшой размер, высокую чувствительность и возможность измерения на большом расстоянии.

В 2020-х годах достижения в технологиях оптических волокон проложили путь для интеграции волоконно-оптических датчиков в различные конструкционные материалы, включая композиты и бетон. Эта интеграция позволила разработать сети распределенных датчиков, которые могут обеспечить комплексный мониторинг поведения конструкций. Потенциальные применения интегрированных волоконно-оптических датчиков выходят за рамки мониторинга состояния конструкций и включают в себя значимые медицинские технологии, мониторинг окружающей среды и управление производственными процессами.

Целью этой обзорной статьи является рассмотрение последних достижений в области интегрированных волоконно-оптических датчиков для мониторинга структурного состояния. Обзор включает разнообразный спектр используемых механизмов обнаружения, включая волоконные решётки Брэгга (fiber Bragg gratings, FBGs), бриллюэновскую оптическую рефлектометрию во временной области (Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR) [11], [12], [13] и Рамановскую спектроскопию или спектроскопию комбинационного рассеяния (Raman spectroscopy) [14]. Кратко изложены проблемы и возможности, связанные с интеграцией волоконно-оптических датчиков в различные конструкционные материалы, а также новые тенденции в измерительных технологиях и анализе данных для приложений мониторинга структурного состояния.

Фундаментальные принципы измерения с применением оптического волокна в мониторинге состояния конструкций достаточно известны. Здесь рассмотрены различные типы волоконно-оптических датчиков, подчеркнуты их преимущества и ограничения в различных сценариях мониторинга структурного состояния. Интеграция волоконно-оптических датчиков в композитные материалы, бетонные конструкции и текстильные изделия увязана с конкретными особенностями различных материалов.

В обзоре также затронуты проблемы анализа и интерпретации данных, связанные с сетями распределенных датчиков. Интерес представляют методы объединения данных, распознавания образов и оценки состояния, подчеркивая роль искусственного интеллекта и машинного обучения в расширении возможностей мониторинга структурного состояния [15]. Наконец, обзор завершается описанием возможных будущих направлений использования интегрированных волоконно-оптических датчиков в мониторинге структурного состояния с упором на достижения в области измерительных технологий, совместимости материалов и анализа данных.

В этом обзоре продолжена оценка последних достижений в области волоконно-оптических датчиков и методов их интеграции в мониторинге состояния конструкций в недавних обзорных работах [16], [17], [18], [19] и [20], [21] и более новых исследовательских работах [20], [22–32] и др. Далее эти публикации будут рассмотрены более подробно.

2 Мониторинг структурного состояния (SHM)

2.1 Волоконно-оптические датчики

Системы мониторинга структурного состояния состоит из сети датчиков, интегрированных со строительной конструкцией или ее структурным элементом [33], [34], [35]. Интегрированность датчиков в виде размещения их внутри конструктивных элементов на этапе их формирования (изготовления) без возможности последующего демонтажа есть главное отличие от традиционных методов неразрушающего контроля. Сеть датчиков используется для проведения эпизодических и непрерывных проверок. Большое количество постоянно работающих датчиков генерирует большое количество данных, которые необходимо обрабатывать, причем во многих случаях в режиме реального времени. Поэтому используют оптимизированные средства обработки данных, чтобы обеспечить мгновенный анализ конструкций или структурных компонентов посредством мгновенного получения данных мониторинга. Используются специализированные алгоритмы сохранения и анализа данные для обнаружения повреждения, его местоположения и характеристик [36], [37], [38].

Использование оптоволоконных датчиков, встроенных до отверждения в железобетонные здания, мосты, плотины и резервуары, для неразрушающего измерения внутренней деформации и оценки структурной целостности было предложено еще в 1990 г. [39]. В зависимости от вида модуляции передаваемого света оптические волоконные датчики классифицируются в [16] и в [19]



как модулированные по интенсивности [40], модулированные по поляризации [41], модулированные по фазе [42] и модулированные по длине волны [43].

2.1.1 Волоконные решётки Брэгга

Волоконные решётки Брэгга (fiber Bragg gratings, FBGs) являются одними из широко используемых типов оптических волоконных датчиков, особенно в приложениях мониторинга состояния конструкций. Перспективная способность FBG-датчиков к одновременному измерению деформации и температуры сделала их привлекательным вариантом для внедрения в широкий спектр материалов.

Волоконная решётка Брэгга это дифракционная решетка, локализованная в сердцевине оптического волокна, которая образована за счет периодического изменения показателя преломления кварцевого стекла под воздействием электромагнитного излучения [16]. Волоконные решётки Брэгга вписаны внутрь сердцевины волокна, локально увеличивая показатель преломления сердцевины волокна. Рабочий механизм ВБР основан на френелевском отражении. Свет проходит через сердцевину волокна, покрытую оболочкой.

2.1.2 Волоконно-оптические датчики на основе модулирования по интенсивности

Датчики с модулированной интенсивностью являются одними из первых типов оптических датчиков, которые в основном полагаются на изменение интенсивности света под действием физических возмущений на пути светового потока [40]. Такие возмущения могут быть вызваны отражением, изгибом волокна и т.п. [44]. Хотя датчики с модулированной интенсивностью обладают простотой и низкой стоимостью, такие проблемы, как колебания мощности света, потери мощности в элементах связи, а также поглощение и рассеяние, значительно ограничивают их использование в высокоточных приложениях [45].

2.1.3 Волоконно-оптические датчики на основе модулирования по поляризации

Волоконно-оптические датчики, модулированные по поляризации (PMS) основаны на волокнах, которые изменяют поляризацию света, переносимого по волокну [41]. Изменение поляризации света затем связано с внешним воздействием, таким как напряжение, температура, давление и т.д. Датчики, модулированные по поляризации, могут быть реализованы через различные механизмы, такие как специально разработанные оптические волокна, геометрические модификации волокна и физические эффекты, такие как эффекты фазовой задержки. Изучение и разработка этих структур требует внимательного анализа и моделирования оптических характеристик, связанных с поляризацией, а также их взаимодействия с внешними факторами.

Экспериментальные и численные исследования поляризационных модулированных оптических волоконных датчиков (PM-OFSS) позволили оптимизировать их чувствительность и производительность. Например, использование особенностей бимодальной поляризации волокон позволило создать высокочувствительные датчики с дополнительной изоляцией от шума [44]. Оптические волоконные датчики, модулированные по поляризации, также показали свою эффективность в измерениях температуры, деформации, давления и других параметров. Они обеспечивают возможность системы датчиков с высокой точностью и стабильностью при различных условиях эксплуатации.

2.1.4 Волоконно-оптические датчики на основе модулированных по фазе

Волоконно-оптические датчики, модулированные по фазе (PMS) которые также называются интерферометрическими волоконно-оптическими датчиками, основаны на измерении изменений фазы света, проходящего через оптическое волокно. Эти изменения фазы могут быть вызваны воздействием внешних факторов, таких как температура, деформация, напряжение, давление и другие. PMS-датчики могут быть реализованы с использованием различных методов. Наиболее распространенными интерферометрическими датчиками являются интерферометры Фабри-Перо, Маха-Цендера [42], Майкельсона и Саньяга [16].

В общем, интерферометры используются для равномерного разделения света на два пути, так что один рассматривается как опорный, а на другой путь влияют физические воздействия [46]., Такими воздействиями, согласно [47], могут быть давление [48], растяжение [49], температура и вибрация [50], ускорение [51] и др. [52].

Применение оптимальных алгоритмов демодуляции сигналов, в том числе использующих статистические свойства сигналов способно обеспечить достижения именно фундаментальных ограничений точности, разрешающей способности и динамического диапазона [25], [31].



2.2 Примеры применения волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния строительных конструкций

2.2.1 Применение волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния текстильно-армированного бетона

В обзоре 2021 г. [53] представлено подробное описание технологии встраивания волоконно-оптических датчиков в арматурные элементы строительных конструкций из текстильно-армированного бетона (TRC) на этапе производства бетона, обеспечивая эффективный мониторинг и более широкий набор возможностей по сравнению с традиционными средствами мониторинга состояния конструкции. Этот мониторинг в сочетании с концепциями искусственного интеллекта приводит к созданию распределенных измерительных сетей интеллектуального мониторинга. Сети мониторинга могут быть дополнены средствами уменьшения ошибок, например, как в работе [26].

2.2.1.1 Волоконно-оптические датчики, встроенные в текстильно-армированный бетон

Текстильно-армированные бетоны на основе базальтофибропластика, стеклопластика и углепластика получили широкое распространение [54]. Объектом многих исследований является работоспособность и долговечность FOS которые подвергаются внешним воздействиям во время установки, а также на протяжении всего срока службы, включая воздействия окружающей среды [17]. При изготовлении и монтаже строительных конструкций и монтаже с FOS необходимо решить и логистические проблемы. Например, оптоволоконные провода уязвимы к поломке в месте выхода из бетона [53].

Комбинация FOS и армирующих геосеток описана в [55], [56], [57]. Статья [58] излагает применение датчика с волоконно-оптической решеткой Брэгга (FBG) и композитным внешним или внутренним FRP армированием. Показано, что точность деформации, измеренной с помощью датчика FBG, сильно зависит от характеристик соединения между голым оптическим волокном, защитным покрытием, клеевым слоем и основным материалом. В общем, сигнал, полученный от встроенного датчика FBG, должен отражать напряженно-деформированное состояние основной конструкции. Однако из-за наличия клеевого слоя и защитного покрытия часть энергии деформации преобразуется в сдвиговую деформацию защитного покрытия и клеевого слоя. Следовательно, механические свойства материалов защитного покрытия и клеевого слоя будут влиять на результат измерения деформации внедренным в конструкцию FBG-датчиком. В статье [58] представлена теоретическая модель для оценки дифференциальных напряжений между голым волокном и основным материалом с различной толщиной клея и модулем защитного покрытия встроенного FBG-датчика. Результаты теоретического моделирования сравнены с численным МКЭ-анализом. Экспериментальные работы проводились как для композитов из стекловолокна, так и для балок из армированного стеклопластиком бетона со встроенными датчиками FBG. Для сравнения результатов, полученных от датчиков FBG, использовались наклеенные снаружи на балку тензорезисторы. Теоретический анализ показал, что с увеличением толщины клеевого слоя осевая деформация, измеренная в области сердцевины волокна, оказывается ниже, чем истинная деформация основного материала. Толстый клеевой слой и низкий модуль материала покрытия увеличивают зону концентрации напряжения сдвига в области конца склейки. В целом исследование показало, что датчик FBG можно уверенно использовать для мониторинга.

В экспериментальном исследовании [59] датчики с волоконно-оптической решеткой Брэгга (FBG) были встроены как в сам бетон в растянутую область бетонной балки, так и в текстильное армирование. Также была разработана теоретическая модель для интерпретации полученных экспериментальных результатов. Основные выводы можно резюмировать следующим образом. Было показано, что деформация в бетоне может быть намного, до 3.8 раз, выше, чем в арматуре, если происходит проскальзывание между поверхностями сопряжения бетона и арматуры. Для усиленных бетонных балок FRCM наблюдалось почти полное разъединение.

Характеристики датчиков двух систем исследовались *in situ* в [60] с использованием интерферометрических методов Маха-Цендера [42] и оптического измерения затухания. С этой целью образцы различных функционализированных углеродных структур подвергали различному удлинению с использованием разрывной машины, плавно увеличивая силу растяжения. Наблюдалась хорошая корреляция между приложенной силой и измеренным удлинением. Для обнаружения трещин функционализированные текстильные сетчатые структуры были встроены



в бетонный блок, который затем подвергался переменной нагрузке с использованием трехточечного испытания на изгиб до разрушения. Показано, что местоположение трещины можно определить с помощью обычного метода оптической рефлектометрии во временной области (OTDR).

2.2.1.2 Автоматически включение оптических волокон в бетон во время изготовления армируемой конструкции

Включение оптических волокон в бетон может быть выполнено либо вручную, либо автоматически во время изготовления армируемой конструкции. Для массового производства крупных текстильно-армированных конструкций последний способ внедрения является более экономичным. Уже выполнен значительный объем работы над текстильно-армированным бетоном, интегрированным с FOS. Разработаны различные методы автоматического включения оптических волокон в текстильно-армирующие конструкции на текстильной основе. Для интеграции оптических волокон в текстильные сетчатые структуры (TNS) разработана специальная техника вязания [60], [61]. Текстильные сетчатые структуры представляют собой двухосные сетки, состоящие из щелочестойкой стеклянной мультифиламентной нити, расположенной в направлениях 0° и 90° , и полипропиленовой многофиламентной (многоволоконной) нити. Сетки изготавливаются на основовязальной машине, а затем стабилизируются путем нанесения сополимерного покрытия. Для интеграции оптических волокон изготовлены текстильные сетчатые структуры с шагом 20 мм и щелочестойкую стеклянную многофиламентную нить 2400 текс (международная весовая десятичная система нумерации пряжи, выраженная весом 1000 метров в граммах), а также многофиламентную нить 44 текс. Оптическое стекловолокно было добавлено в процессе вязания текстильных сетчатых структур. Технология сшивания не только обеспечивает адекватное соединение между оптоволоконным датчиком и текстильной сетчатой структура, но и обеспечила низкие потери света на изгибах оптического волокна [60]. Технология создание текстильных сетчатых структур также подробно описана в [62]. Три различных процесса заделки волокон, влияние различные узоров плетения на датчики рассмотрено в [63].

2.2.1.3 Влияние щелочной среды бетона на углеродную армирующую структуру

Вода в порах портландцемента имеет щелочную реакцию с pH в диапазоне от 11,5 до 13,5 [64]. Следовательно, в текстильно-армированном бетоне сильнощелочная среда может ухудшить механические свойства как оптического стекловолокна, так и текстильных нитей, а также связь между этими двумя компонентами арматуры, тем самым ограничивая срок службы и работу комбинированных элементов. Поэтому влияние сильнощелочной среды бетона на функционализированную углеродную армирующую структуру на текстильной основе было исследовано в [64]. В этом исследовании исследовалась стойкость функционализированной армирующей структуры на текстильной основе к сильнощелочным средам в зависимости от покрытия оптического стекловолокна (акрилат, полиимид и углерод) и числа текс текстильной нити (400, 800, и 1600 текс). Кроме того, для моделирования высокощелочной среды бетона в этом исследовании использовался 5% раствор NaOH (pH 14), и образцы подвергались воздействию этого раствора в течение трех месяцев. В результате исследования показано, что оптические стекловолокна с углеродным покрытием обладают наилучшей устойчивостью к щелочной поровой воде [64]. Наилучшая стойкость была получена для армирующих конструкций на текстильной основе с более высокими числами текс [96].

Однако интеграция волоконно-оптических датчиков в текстильно-армированный все еще находится на ранних стадиях разработки, и поэтому нет достаточной литературы для сравнения их характеристик, структурных или с точки зрения эффективности и экономичности. Тем не менее, учитывая тенденцию развития новых технологий армирования в сочетании с потенциальным цифровым производством бетона, они имеют хорошие перспективы для развития.

2.2.2 Волоконно-оптический контроль деформаций монолитных бетонных и железобетонных конструкциях

Волоконно-оптические датчики становятся превосходным неразрушающим средством оценки состояния бетонных конструкций. В отличие от традиционных методов неразрушающего контроля, Волоконно-оптические датчики оказались способны обнаруживать мельчайшие изменения в структурных состояниях посредством дистанционных измерений. [65]. В бетонных мостах деформации являются наиболее важным параметром, который необходимо отслеживать как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Наружный мониторинг деформации дает



только локальную информацию о поведении материала. Поэтому для полного понимания поведения моста потребуется слишком много таких датчиков. Было обнаружено [66], что волоконно-оптические датчики деформации с базой измерений порядка одного-несколько метров могут давать полезную информацию как в первые дни после укладки бетона, так и в долгосрочной перспективе. На первом этапе можно отслеживать тепловое расширение вследствие экзотермической реакции схватывания и, следовательно, термическую усадку и усадку при высыхании. Благодаря длинной базе датчиков обнаружение трещины в области измерения одного датчика становится более вероятным, и поэтому за развитием трещин можно следить с помощью меньшего количества датчиков. В долгосрочной перспективе можно измерить геометрические деформации и, следовательно, перемещения мостовых конструкций под действием статических нагрузок, особенно под собственным весом. В [66] описан результат установки за двухгодичный период сотни оптоволоконных датчиков деформации на более чем на пяти бетонных, композитных сталебетонных, реконструируемых и расширенных мостах (автодорожных, автомагистральных и железнодорожных). Методика измерения была основана на низкокогерентной интерферометрии [31], [25] и обеспечивала разрешение до нескольких микрон даже для долгосрочных измерений.

В [67] были предложены два волоконно-оптических метода мониторинга напряженно-деформируемого состояния бетонных строительных конструкциях. Первый метод основан на использовании в качестве датчика волоконно-оптического двухмодового интерферометра. Показано, что одноволоконный двухмодовый интерферометр, имплантированный в конструкцию испытуемого бетонного изделия, позволяет измерять прогиб изделия, абсолютное удлинение и остаточные деформации в реальном времени с точностью не хуже 0.05 мкм. Показано также, что разработанный интерферометрический метод позволяет указать момент времени зарождения трещины в конструкции, а также оценить перемещение вершины раскрытия трещины. Второй метод, основанный на использовании одноволоконного многомодового датчика и фоторефрактивного кристалла, позволяет долговременно отслеживать динамику образования трещин в режиме реального времени.

Известно, что изогнутые бетонные мостовые балки имеют очень сложное распределение внутренних сил, напряжений и деформаций. Вследствие их формы возникают не только обычные изгибающие моменты и поперечные силы, но и значительные крутящие моменты. Эти моменты поворачивают оси главных растягивающих напряжений, увеличивая риск образования трещин. Последующее преднапряжение (преднапряжение стержневой или канатной арматуры без сцепления с бетоном) может предотвратить образование трещин, но дополнительные силы сжатия, приложенные в разных направлениях, усложняют поля напряжений и деформаций. Поэтому изогнутые балки из постнапряженного бетона должны быть специально спроектированы и тщательно изготовлены. Однако желательно контролировать реальное состояние конструкции, а риски и неопределенности, связанные с конструкционным проектированием и качеством строительства, свести к минимуму. Для таких балок в [68] был предложен метод мониторинга состояния конструкций, основанный на использовании волоконно-оптической интерферометрической технологии, включающей датчики большой длины и инклинометры. Изогнутая коробчатая бетонная балка моста длиной 36 метров была оснащена так называемыми параллельной и скрещенной топологией волоконно-оптических датчиков и инклинометрами для мониторинга осевой деформации, изменений как горизонтальной, так и вертикальной кривизны, кручения, средней деформации сдвига и поворотов в обоих вертикальных планах.

В [69] представлены лабораторные испытания с целью проверки пригодности стандартных оптических волокон в герметичной оболочке для расширенного анализа деформации внутри бетонных элементов. Оптический рефлектометр использовался для обработки оптического сигнала на основе явления рэлеевского рассеяния. Деформации и/или изменения температуры определялись по длине измерительного волокна. Измерения проводились с пространственным разрешением от 5 мм. Расположение оптических волокон внутри неоднородной бетонной среды и на ее поверхности позволило выявить и детально проанализировать локальные трещинообразования под нагрузкой. Целью исследований был анализ распределения деформаций по сжатым и растянутым измерительным участкам, расположенным на поверхности цилиндрического образца бетона. В ходе последующих испытаний железобетонный с установленной внутри оптоволоконном цилиндр был эксцентрично растянут. Произведена качественная и количественная проверка ширины раскрытия трещин в узком диапазоне до 0.05 мм и в более широком диапазоне до 0.30 мм. Результаты исследований показывают хорошую

Kordas, G.; Liokumovich, L.; Ushakov, N.

Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: A Review; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2909. doi: 10.57728/ALF.29.9



точность волоконно-оптической сенсорной технологии в качестве эталонного метода при анализе микротрещин и узких трещин и умеренную точность в случае более широких трещин.

Необычное применение волоконных решёток Брэгга (fiber Bragg gratings, FBGs) представлено В [70]. Описано применение фотоакустической сенсорной системы с четырьмя элементами для мониторинга коррозии стальной арматуры в железобетонных конструкциях. Датчик использовал фотоакустический механизм нанокompозитов золота для генерации широкополосных ультразвуковых импульсов частотой 8 МГц в компактном пространстве толщиной 0,4 мм. Для инициирования ультразвуковой реакции использовались наносекундный импульсный лазер с длиной волны 532 нм и многомодовое оптическое волокно длиной 400 мкм. Волоконные решётки Брэгга использовались в качестве распределенных детекторов ультразвука.

В статье [71] был представлен метод мониторинга железобетона по характеристикам отражения волоконной решётки Брэгга. Был предложен метод постобработки для извлечения координат вершин трещин из трехмерного расчета методом конечных элементов. Трехосные напряжения волоконной решётки Брэгга также были извлечены из того же расчета методом конечных элементов, а затем преобразованы в деформацию длины волны отраженного спектра волоконной решётки Брэгга. Результат трехмерного расчета ширины трещины в зависимости от деформации спектра волоконной решётки Брэгга был сравнен с результатами лабораторных экспериментов. Результаты показали, что численные значения приближаются к экспериментальным.

В [72] описывается применение прототипа преобразователя для непрерывного мониторинга как в структурной строительной, так и в геотехнической областях. Датчик представляет собой провод из оптического волокна, встроенный между двумя волоконными лентами (стекловолокно или углеродное волокно) и склеенный матрицей из полиэфирной смолы. Концы оптоволоконных проводов подключены к блоку управления, основанному на бриллюэновской оптической рефлектометрии во временной области (Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR) [11], [12], [13]. В каждом лабораторном эксперименте датчик дополнялся наборами инклинометров в разных конфигурациях и с разными условиями ограничений. Собранные экспериментальные данные сравнивались с теоретическими моделями и с данными, полученными при использовании различных измерительных приборов для одновременной проверки и калибровки преобразователя. Показана возможность использования датчика в составе комбинированной системы мониторинга зданий и сооружений.

Статья [73] сообщает о датчике изгиба с высокой гибкостью и эластичностью на основе волоконных решёток Брэгга в полимерных оптических волокнах для обнаружения изгиба и для измерения движения. Концепция основана на эксцентрическом включении волоконных решёток Брэгга в многомодовые градиентные полимерные оптические волокна. В зависимости от деформации датчика волоконная решётка Брэгга растягивается или сжимается в зависимости от ее положения относительно сердцевины волокна. Это, в свою очередь, приводит к специфическому сдвигу брэгговской длины волны до 1.3 нм в красную или синюю область длин волн, соответственно, что достаточно велико для надежного обнаружения. Поэтому в качестве доказательства принципа можно наблюдать деформацию вдоль одной оси с помощью одной волоконных решёток Брэгга с максимальной чувствительностью до 65 пм/м^{-1} . Более того, несколько решеток Брэгга, включенных в одно и то же полимерное оптическое волокно в разных положениях вокруг оси волокна, позволяют с одинаковой точностью определять деформацию волокна. Этот датчик изгиба может стать основой для новых приложений. Близкий по конструкции датчик изгиба предложен в [74]. Кривизну и направление изгиба можно определить путем опроса длин волн двух резонансных провалов, а максимальная чувствительность по кривизне составила 5062 нм/м^{-1} . При этом температурная чувствительность датчика составляет менее $-34,9 \text{ pm}^{\circ}\text{C}$. Аналогичный датчик испытывался в [75], [76] и в [28]. Интересным приложением подобных датчиков является гибкая сенсорная система, которая будет реализована в сенсорной перчатке, отслеживающая движение пальцев и обнаруживающая различные жесты рук [28], [30].

Предложены датчики на основе пластикового оптического волокна для испытаний бетона на сжатие и растяжение [77]. Датчики изготавливаются из пластиковых оптических волокон без покрытия и прикрепляются к бетонным поверхностям или закладываются в бетон с тремя пространственными конфигурациями: прямой, с одним изгибом и с двумя изгибами. Давление на датчик вызывает потерю мощности излучения. Чувствительности и разрешения при испытании бетона на сжатие составили 0.085 В/кН и 0.047 кН. Чувствительности и разрешения при испытании бетона на растяжение составили 0.082 В/кН и 0.048 кН. Преимущество датчика на основе



пластикового оптического волокна заключается в низкой стоимости и простоте метода измерения, что позволяет применять его для мониторинга состояния строительных конструкций.

В работе [78] наклонная волоконная решетка Брэгга используется для мониторинга коррозии железобетонной конструкции. Используется высокая чувствительность резонансных длин волн оболочки волоконной решетки Брэгга к изменению окружающей среды. Датчик монтировался на стальной арматурный стержень, который замоноличен в бетонный блок. В эксперименте искусственно ускорялся процесс коррозии. Полученный спектр передачи волоконной решетки Брэгга во время эксперимента обрабатывается с использованием цифрового преобразования Фурье для получения индекса, чувствительного к образующимся продуктам коррозии, окружающим датчик с волоконной решетки Брэгга.

Статья [23] представляет волоконно-оптические сенсорные ткани и метод их установки внутри мостовых балок. Сенсорная ткань использовалась для мониторинга распределения деформации на однопролетном мосту с бетонной коробчатой балкой. Этот мост Grist Mill Bridge расположен в штате Мэн, США. Сенсорная ткань была создана с помощью процесса химического объединения волокон, при котором непрерывное волокно соединялась в структуру открытой сетки [63]. Использовалась бриллюэновская оптическая рефлектометрия во временной области (BOTDA) [11], [12], [13]. Реакция на растяжение балки моста была успешно зарегистрирована сенсорной тканью во время нагрузочных испытаний, в которых участвовали четыре грузовика, находившихся на мосту. Сенсорная ткань продемонстрировала способность различать отдельные места нагрузки. Эти результаты демонстрируют новый способ установки оптоволоконных датчиков и потенциальное применение волоконно-оптических сенсорных тканей для мониторинга состояния конструкций.

Аналогичным образом сформированная сенсорная ткань была установлена на пешеходном мосту в Массачусетском университете Лоуэлла Массачусетс, США [32]. Данные о динамической деформации были собраны за два года (2021 и 2022). Использовалась оптическая рефлектометрия в частотной области (OFDR) [79], [80]. Наборы данных разных лет сравнены, чтобы определить изменения в данных после одного года установки. Показано, что существенных изменений в характере ответа не наблюдалось. Разница между амплитудой обоих наборов данных составляла 14% (что соответствует нагрузке от одного человека, прыгающего на мосту) и 43% (что соответствует нагрузке от двух человек, прыгающих на мосту). Отсутствие существенных изменений показывает функциональность предлагаемой системы после года установки, а также ее потенциальное использование для мониторинга дорожного движения.

В работе [22] предлагается простая конфигурация волоконно-оптического датчика (FOS), используемого для измерения прогиба бетонных балок. В волоконно-оптического датчика использовалось многомодовое оптическое волокно, поскольку оно демонстрировало лучшее поведение, чем одномодовое волокно. Деформация волокна, связанная с прогибом бетонной балки, вызывала потери света в оптическом волокне. Чувствительность датчика, рассчитанная в ходе лабораторных испытаний с использованием многомодального волокна составила 0.34785 дБ/см. Кроме того, волоконно-оптический датчик был проверен на бетонной балке в режиме реального времени с использованием 50-тонного пресса с переменной нагрузкой. Полученная при этой проверке чувствительность составила 0.02932 дБ/см.

3 Conclusion

Мониторинг состояния конструкций (SHM) становится все более важным при управлении инженерными сооружениями, такими как мосты, туннели и здания. Мониторинг состояния конструкций это процесс постоянного мониторинга структурной целостности конструкции, оценки любого потенциального повреждения или ухудшения состояния и обеспечения безопасности и работоспособности конструкции.

В обзоре рассмотрены последние достижения в области интегрированных волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния конструкций. Обзор включает разнообразный спектр используемых механизмов обнаружения, включая волоконные решетки Брэгга (FBG), бриллюэновскую оптическую рефлектометрию во временной области (BOTDR) и Рамановскую спектроскопию или спектроскопию комбинационного рассеяния (Raman spectroscopy). Кратко изложены проблемы и возможности, связанные с интеграцией волоконно-оптических датчиков в различные конструкционные материалы, а также новые тенденции в измерительных технологиях и анализе данных для приложений мониторинга структурного состояния.

Kordas, G.; Liokumovich, L.; Ushakov, N.

Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: A Review; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2909. doi: 10.57728/ALF.29.9



Фундаментальные принципы измерения с применением оптического волокна в мониторинге состояния конструкций достаточно известны. В обзоре кратко рассмотрены различные типы волоконно-оптических датчиков, подчеркнуты их преимущества и ограничения в различных сценариях мониторинга состояния конструкций. Интеграция волоконно-оптических датчиков в композитные материалы, бетонные конструкции и текстильные изделия увязана с конкретными особенностями различных материалов.

В обзоре также затронуты проблемы анализа и интерпретации данных, связанные с сетями распределенных датчиков. Интерес представляют методы объединения данных, распознавания образов и оценки состояния, подчеркивая роль искусственного интеллекта и машинного обучения в расширении возможностей мониторинга структурного состояния. Наконец, обзор завершается описанием возможных будущих направлений использования интегрированных волоконно-оптических датчиков в мониторинге структурного состояния с упором на достижения в области измерительных технологий, совместимости материалов и анализа данных.

Основные выводы

1. Волоконно-оптические датчики обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами неразрушающего контроля, такими как высокая чувствительность, точность, возможность дистанционных измерений и отсутствие необходимости в прямом контакте с объектом измерения.
2. Волоконно-оптические датчики могут быть интегрированы в различные конструкционные материалы, включая композиты, железобетон и текстильно-армированный бетон.
3. Волоконно-оптические датчики могут использоваться для мониторинга широкого спектра параметров структурного состояния, включая деформацию, температуру, трещинообразование и вибрацию.
4. Интегрированные волоконно-оптические датчики имеют потенциал для повышения эффективности и точности мониторинга структурного состояния.

В будущем ожидается дальнейшее развитие интегрированных волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния конструкций. Перспективные направления исследований включают:

1. Совершенствование технологий интеграции волоконно-оптических датчиков в различные конструкционные материалы с целью повышения их надежности и долговечности.
2. Разработка новых типов волоконно-оптических датчиков с улучшенными характеристиками, такими как более высокая чувствительность, точность и динамический диапазон.
3. Разработка новых алгоритмов обработки данных для повышения эффективности и точности анализа данных мониторинга структурного состояния.

Развитие этих направлений исследований позволит сделать интегрированные волоконно-оптические датчики еще более эффективным инструментом для мониторинга состояния конструкций и обеспечения их безопасности и надежности.

4 Fundings

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as the grant Self-Healing Construction Materials (contract No. 075-15-2021-590 dated 04.06.2021).

References

- 1 Pallarés, F.J., Betti, M., Bartoli, G. and Pallarés, L. (2021) Structural Health Monitoring (SHM) and Nondestructive Testing (NDT) of Slender Masonry Structures: A Practical Review. *Construction and Building Materials*, Elsevier BV, **297**, 123768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123768>.
- 2 Bao, Y., Chen, Z., Wei, S., Xu, Y., Tang, Z. and Li, H. (2019) The State of the Art of Data Science and Engineering in Structural Health Monitoring. *Engineering*, Elsevier BV, **5**, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.027>.
- 3 Sony, S., Laventure, S. and Sadhu, A. (2019) A Literature Review of Next-Generation Smart Sensing Technology in Structural Health Monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, Hindawi Limited, **26**, e2321. <https://doi.org/10.1002/stc.2321>.



- 4 Alavi, A.H., Zhang, Q. and Barri, K. (2022) Advanced Multifunctional Structures for Future Smart Cities. *The Rise of Smart Cities: Advanced Structural Sensing and Monitoring Systems*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817784-6.00004-7>.
- 5 Muthalvan, R.S., Ravikumar, S., Avudaiappan, S., Amran, M., Aepuru, R., Vatin, N. and Fediuk, R. (2021) The Effect of Superabsorbent Polymer and Nano-Silica on the Properties of Blended Cement. *Crystals*, **11**, 1394. <https://doi.org/10.3390/cryst11111394>.
- 6 Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Zeyad, A.M., Klyuev, S., Chulkova, I., Ozbakkaloglu, T., Vatin, N., Karelina, M. and Azevedo, A. (2021) Design Strategy for Recycled Aggregate Concrete: A Review of Status and Future Perspectives. *Crystals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **11**, 695. <https://doi.org/10.3390/cryst11060695>.
- 7 Kordas, G. (2023) Protection of HDG Steel Using ORMOSIL Coatings Enhanced with CeO₂(5-ATDT) Ceramic Nanocontainers. *Applied Science and Engineering Progress*, **16**. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2022.10.002>.
- 8 Althoey, F., Amin, M.N., Khan, K., Usman, M.M., Khan, M.A., Javed, M.F., Sabri, M.M.S., Alrowais, R. and Maglad, A.M. (2022) Machine Learning Based Computational Approach for Crack Width Detection of Self-Healing Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01610. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01610>.
- 9 Lesovik, V., Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N. and Timokhin, R. (2021) Self-Healing Construction Materials: The Geomimetic Approach. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9033*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 9033. <https://doi.org/10.3390/SU13169033>.
- 10 Salem, G.G., Galishnikova, V. V., Elroba, S.M., Vatin, N.I. and Kharun, M. (2022) Finite Element Analysis of Self-Healing Concrete Beams Using Bacteria. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 7506. <https://doi.org/10.3390/ma15217506>.
- 11 Li, H., Liu, Y., Cao, J. and Shu, P. (2019) Investigation of the BOTDA Technology for Structural Condition Monitoring of Urban Tunnel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **603**, 42003. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/603/4/042003>.
- 12 Feng, W.-Q., Yin, J.-H., Borana, L., Qin, J.-Q., Wu, P.-C. and Yang, J.-L. (2019) A Network Theory for BOTDA Measurement of Deformations of Geotechnical Structures and Error Analysis. *Measurement*, Elsevier BV, **146**, 618–627. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.010>.
- 13 Zhang, Z., Guan, P., Dong, Y. and Li, H. (2021) Analysis of Horizontal Bearing Capacity of Offshore Pile Foundation Based on DPP-BOTDA. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Springer Science and Business Media LLC, **12**, 747–756. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00506-8>.
- 14 Yue, Y., Wang, J.J., Basheer, P.A.M., Boland, J.J. and Bai, Y. (2018) A Raman Spectroscopy Based Optical Fibre System for Detecting Carbonation Profile of Cementitious Materials. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, **257**, 635 – 649. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.10.160>.
- 15 Chen, Y.-L., Chiang, Y., Chiu, P.-H., Huang, I.-C., Xiao, Y.-B., Chang, S.-W. and Huang, C.-W. (2021) High-Dimensional Phase Space Reconstruction with a Convolutional Neural Network for Structural Health Monitoring. *Sensors*, **21**. <https://doi.org/10.3390/s21103514>.
- 16 Montazerian, H., Rashidi, A., Milani, A.S. and Hoorfar, M. (2020) Integrated Sensors in Advanced Composites: A Critical Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **45**, 187–238. <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1588705>.
- 17 Alwis, L.S.M., Bremer, K., Weigand, F., Kuhne, M., Helbig, R. and Roth, B. (2020) Evaluation of the Potential of Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Carbon Fiber-Reinforced Concrete Composites. *Optics InfoBase Conference Papers*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85136798785&partnerID=40&md5=84fbb0575ccf4d1bce16e39fd2819eed>.
- 18 Akinlolu, M., Haupt, T.C., Edwards, D.J. and Simpeh, F. (2022) A Bibliometric Review of the Status and Emerging Research Trends in Construction Safety Management Technologies. *International Journal of Construction Management*, **22**, 2699–2711. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1819584>.
- 19 Ferreira, P.M., Machado, M.A., Carvalho, M.S. and Vidal, C. (2022) Embedded Sensors for Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications Review. *Sensors*, **22**. <https://doi.org/10.3390/s22218320>.
- 20 Li, S., Li, H., Lu, Y., Zhou, M., Jiang, S., Du, X. and Guo, C. (2023) Advanced Textile-Based Wearable Biosensors for Healthcare Monitoring. *Biosensors*, **13**. <https://doi.org/10.3390/bios13100909>.

Kordas, G.; Liokumovich, L.; Ushakov, N.

Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: A Review; 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2909. doi: 10.57728/ALF.29.9



- 21 Llorens, M., Serrano, Á. and Valcuende, M. (2019) Sensors for Determining the Durability of Reinforced Concrete Constructions [Sensores Para La Determinación de La Durabilidad de Construcciones de Hormigón Armado]. *Revista Ingeniería de Construcción*, **34**, 81–98. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732019000100081>.
- 22 Camas-Anzueto, J.L., Juan-Jimenez, A.M., Anzueto-Sanchez, G., Perez-Patricio, M., Grajales-Coutino, R., Hernandez-Gutierrez, C.A. and Alonso-Farrera, F.A. (2023) Simple Configuration of a Fiber Optic Sensor for Measuring Deflection in Concrete Beams. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 6840–6848. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3242584>.
- 23 Wu, R., Biondi, A., Cao, L., Gandhi, H., Abedin, S., Cui, G., Yu, T. and Wang, X. (2023) Composite Bridge Girders Structure Health Monitoring Based on the Distributed Fiber Sensing Textile. *Sensors*, **23**. <https://doi.org/10.3390/s23104856>.
- 24 Zhang, X., Wang, C., Zheng, T., Wu, H., Wu, Q. and Wang, Y. (2023) Wearable Optical Fiber Sensors in Medical Monitoring Applications: A Review. *Sensors*, **23**. <https://doi.org/10.3390/s23156671>.
- 25 Ushakov, N.A., Makovetskaya, T.A., Marquart, A.A. and Liokumovich, L.B. (2023) Theoretical Foundations of Quantum Spectral Optical Coherence Tomography with Frequency Scanning. *JETP Letters*, **117**, 29–36. <https://doi.org/10.31857/S1234567823010032>.
- 26 Fu, X., Zhou, F., Yun, H., Kim, E., Chen, S. and Jun, M.B.-G. (2023) Machine Straightness Error Measurement Based on Optical Fiber Fabry-Pérot Interferometer Monitoring Technique. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **145**. <https://doi.org/10.1115/1.4055897>.
- 27 Abedin, S., Biondi, A.M., Cao, L., Wu, R., Yu, T. and Wang, X. (2023) A Textile Embedded with Distributed Fiber Optic Sensors for Pedestrian Bridge Monitoring. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **433 LNCE**, 689–695. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39117-0_70.
- 28 Leffers, L., Roth, B. and Overmeyer, L. (2023) Evaluation of Polymer-Based Eccentric FBG Bending Sensor for Humidity, Strain, Temperature and Torsion. *Optics and Lasers in Engineering*, **166**. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107568>.
- 29 Leffers, L., Roth, B. and Overmeyer, L. (2023) Polymer Optical Sensor Glove Prototype Based on Eccentric FBGs. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.2647682>.
- 30 Leffers, L., Roth, B. and Overmeyer, L. (2023) Characterisation of a Polymer-Based Eccentric FBG 3D Shape Deformation Sensor. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.2647687>.
- 31 Markvart, A., Sedov, N., Zavalishina, L., Liokumovich, L. and Ushakov, N. (2023) Measurement Resolution of Fiber-Optic Fabry - Perot Interferometers with Different Mirrors Reflectivity. Proceedings of the 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2023, 436–438. <https://doi.org/10.1109/EExPolytech58658.2023.10318649>.
- 32 Abedin, S., Biondi, A.M., Wu, R., Cao, L. and Wang, X. (2023) Structural Health Monitoring Using a New Type of Distributed Fiber Optic Smart Textiles in Combination with Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR): Taking a Pedestrian Bridge as Case Study. *Sensors*, **23**. <https://doi.org/10.3390/s23031591>.
- 33 Sbarufatti, C., Manes, A. and Giglio, M. (2013) Application of Sensor Technologies for Local and Distributed Structural Health Monitoring: APPLICATION OF SENSOR TECHNOLOGIES FOR LOCAL AND DISTRIBUTED SHM. *Structural Control and Health Monitoring*, Hindawi Limited, **21**, 1057–1083. <https://doi.org/10.1002/stc.1632>.
- 34 Hong, C.-Y., Zhang, Y.-F., Li, G.-W., Zhang, M.-X. and Liu, Z.-X. (2017) Recent Progress of Using Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors for Geotechnical Health Monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier BV, **258**, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.03.017>.
- 35 Wu, T., Liu, G., Fu, S. and Xing, F. (2020) Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Sensors*, MDPI AG, **20**, 4517. <https://doi.org/10.3390/s20164517>.
- 36 Brownjohn, J.M.W. (2006) Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, **365**, 589–622. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1925>.
- 37 Farrar, C.R. and Worden, K. (2006) An Introduction to Structural Health Monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, **365**, 303–315. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>.
- 38 Güemes, A., Fernandez-Lopez, A., Pozo, A.R. and Sierra-Pérez, J. (2020) Structural Health

Kordas, G.; Liokumovich, L.; Ushakov, N.

Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: A Review; 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2909. doi: 10.57728/ALF.29.9



- Monitoring for Advanced Composite Structures: A Review. *Journal of Composites Science*, MDPI AG, **4**, 13. <https://doi.org/10.3390/jcs4010013>.
- 39 Mendez, A., Morse, T.F. and Mendez, F. (1990) Applications Of Embedded Optical Fiber Sensors In Reinforced Concrete Buildings And Structures. In: Udd, E., Ed., *Fiber Optic Smart Structures and Skins II*, SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.963084>.
- 40 Cennamo, N., Testa, G., Marchetti, S., De Maria, L., Bernini, R., Zeni, L. and Pesavento, M. (2017) Intensity-Based Plastic Optical Fiber Sensor with Molecularly Imprinted Polymer Sensitive Layer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier BV, **241**, 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.10.104>.
- 41 Saxer, C.E., de Boer, J.F., Park, B.H., Zhao, Y., Chen, Z. and Nelson, J.S. (2000) High-Speed Fiber-Based Polarization-Sensitive Optical Coherence Tomography of in Vivo Human Skin. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, **25**, 1355. <https://doi.org/10.1364/ol.25.001355>.
- 42 Tan, Z., Hao, X., Shao, Y., Chen, Y., Li, X. and Fan, P. (2014) Phase Modulation and Structural Effects in a D-Shaped All-Solid Photonic Crystal Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor. *Optics Express*, The Optical Society, **22**, 15049. <https://doi.org/10.1364/oe.22.015049>.
- 43 Zhou, J., Liao, C., Wang, Y., Yin, G., Zhong, X., Yang, K., Sun, B., Wang, G. and Li, Z. (2014) Simultaneous Measurement of Strain and Temperature by Employing Fiber Mach-Zehnder Interferometer. *Optics Express*, The Optical Society, **22**, 1680. <https://doi.org/10.1364/oe.22.001680>.
- 44 Park, Y.-L., Ryu, S.C., Black, R.J., Chau, K.K., Moslehi, B. and Cutkosky, M.R. (2009) Exoskeletal Force-Sensing End-Effectors With Embedded Optical Fiber-Bragg-Grating Sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), **25**, 1319–1331. <https://doi.org/10.1109/tro.2009.2032965>.
- 45 Zhao, Y. and Liao, Y. (2004) Discrimination Methods and Demodulation Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier BV, **41**, 1–18. [https://doi.org/10.1016/s0143-8166\(02\)00117-3](https://doi.org/10.1016/s0143-8166(02)00117-3).
- 46 Rajan, G. (2017) Introduction to Optical Fiber Sensors. *Optical Fiber Sensors*, CRC Press, 1–12. <https://doi.org/10.1201/b18074-1>.
- 47 Markvart, A.A., Liokumovich, L.B. and Ushakov, N.A. (2019) Spectral Interferometry for High-Finesse Fabry-Perot Sensors: Cramer-Rao Bound of Cavity Length Resolution. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 68. <https://doi.org/10.1117/12.2540021>.
- 48 Zhu, Y., Cooper, K.L., Pickrell, G.R. and Wang, A. (2006) High-Temperature Fiber-Tip Pressure Sensor. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), **24**, 861–869. <https://doi.org/10.1109/jlt.2005.862444>.
- 49 Chen, H., Xu, Y., Qian, S., Yuan, H. and Su, L. (2020) Transient Nanostrain Detection in Phi-OTDR Using Statistics-Based Signal Processing. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1–1. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.2996232>.
- 50 Alekseev, A.E., Gorshkov, B.G. and Potapov, V.T. (2019) Fidelity of the Dual-Pulse Phase-OTDR Response to Spatially Distributed External Perturbation. *Laser Physics*, IOP Publishing, **29**, 55106. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab0d15>.
- 51 Pisco, M., Bruno, F.A., Galluzzo, D., Nardone, L., Gruca, G., Rijnveld, N., Bianco, F., Cutolo, A. and Cusano, A. (2018) Opto-Mechanical Lab-on-Fibre Seismic Sensors Detected the Norcia Earthquake. *Scientific Reports*, Springer Science and Business Media LLC, **8**. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25082-8>.
- 52 Pevec, S. and Donlagić, D. (2019) Multiparameter Fiber-Optic Sensors: A Review. *Optical Engineering*, SPIE-Intl Soc Optical Eng, **58**, 1. <https://doi.org/10.1117/1.oe.58.7.072009>.
- 53 Alwis, L.S.M., Bremer, K. and Roth, B. (2021) Fiber Optic Sensors Embedded in Textile-Reinforced Concrete for Smart Structural Health Monitoring: A Review. *Sensors*, **21**. <https://doi.org/10.3390/s21154948>.
- 54 Vatin, N. and Korniyenko, S. V. (2022) Energy Performance of Buildings Made of Textile-Reinforced Concrete (TRC) Sandwich Panels. *Magazine of Civil Engineering*, **113**. <https://doi.org/10.34910/MCE.113.3>.
- 55 Sun, Y., Cao, S., Xu, H. and Zhou, X. (2020) Application of Distributed Fiber Optic Sensing Technique to Monitor Stability of a Geogrid-Reinforced Model Slope. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, Springer Science and Business Media LLC, **6**. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-00209-y>.
- 56 Moser, F., Lienhart, W., Woschitz, H. and Schuller, H. (2016) Long-Term Monitoring of

Kordas, G.; Liokumovich, L.; Ushakov, N.

Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: A Review; 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2909. doi: 10.57728/ALF.29.9



- Reinforced Earth Structures Using Distributed Fiber Optic Sensing. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Springer Science and Business Media LLC, **6**, 321–327. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0172-9>.
- 57 Sun, Y., Xu, H., Gu, P. and Hu, W. (2017) Application of FBG Sensing Technology in Stability Analysis of Geogrid-Reinforced Slope. *Sensors (Switzerland)*, MDPI AG, **17**, 597. <https://doi.org/10.3390/s17030597>.
- 58 Lau, K.T., Yuan, L., Zhou, L.M., Wu, J. and Woo, C.H. (2001) Strain Monitoring in FRP Laminates and Concrete Beams Using FBG Sensors. *Composite Structures*, Elsevier BV, **51**, 9–20. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00094-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00094-5).
- 59 Montanini, R., Recupero, A., de Domenico, F. and Freni, F. (2016) Strain Sharing Assessment in Woven Fiber Reinforced Concrete Beams Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors (Switzerland)*, MDPI AG, **16**, 1564. <https://doi.org/10.3390/s16101564>.
- 60 Bremer, K., Weigand, F., Zheng, Y., Alwis, L.S., Helbig, R. and Roth, B. (2017) Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors. *Sensors (Switzerland)*, **17**. <https://doi.org/10.3390/s17020345>.
- 61 Bremer, K., Wollweber, M., Weigand, F., Rahlves, M., Kuhne, M., Helbig, R. and Roth, B. (2016) Fibre Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Building Structures. *Procedia Technology*, Elsevier BV, **26**, 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.065>.
- 62 Gong, Z., Xiang, Z., OuYang, X., Zhang, J., Lau, N., Zhou, J. and Chan, C.C. (2019) Wearable Fiber Optic Technology Based on Smart Textile: A Review. *Materials*, **12**. <https://doi.org/10.3390/ma12203311>.
- 63 Biondi, A.M., Zhou, J., Guo, X., Wu, R., Tang, Q., Gandhi, H., Yu, T., Gopalan, B., Hanna, T., Ivey, J. and Wang, X. (2022) Pipeline Structural Health Monitoring Using Distributed Fiber Optic Sensing Textile. *Optical Fiber Technology*, Elsevier BV, **70**, 102876. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102876>.
- 64 Bremer, K., Alwis, L.S.M., Zheng, Y., Weigand, F., Kuhne, M., Helbig, R. and Roth, B. (2019) Durability of Functionalized Carbon Structures with Optical Fiber Sensors in a Highly Alkaline Concrete Environment. *Applied Sciences (Switzerland)*, **9**. <https://doi.org/10.3390/app9122476>.
- 65 Ansari, F. (1997) State-of-the-Art in the Applications of Fiber-Optic Sensors to Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, **19**, 3–19. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(96\)00038-8](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(96)00038-8).
- 66 Inaudi, D., Vurpillot, S. and Casanova, N. (1996) Bridge Monitoring by Interferometric Deformation Sensors. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 34 – 45. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030411925&partnerID=40&md5=552305e44301acedf8c0201618a86bb4>.
- 67 Kulchin, Y.N., Vitrik, O.B., Vitrik, Y.I. and Petrov, Y.S. (2001) Fiber Optic Interferometric Method for Investigation of Deformations of Building Structure. *Optoelectronic Information Systems and Processing*, 24. <https://doi.org/10.1117/12.435896>.
- 68 Glišić, B., Posenato, D., Inaudi, D. and Figini, A. (2008) Structural Health Monitoring Method for Curved Concrete Bridge Box Girders. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, 693204. <https://doi.org/10.1117/12.778643>.
- 69 Sieńko, R., Zych, M., Bednarski, Ł. and Howiacki, T. (2018) Strain and Crack Analysis within Concrete Members Using Distributed Fibre Optic Sensors. *Structural Health Monitoring*, SAGE Publications, **18**, 1510–1526. <https://doi.org/10.1177/1475921718804466>.
- 70 Du, C., Owusu Twumasi, J., Tang, Q., Guo, X., Zhou, J., Yu, T. and Wang, X. (2018) All-Optical Photoacoustic Sensors for Steel Rebar Corrosion Monitoring. *Sensors (Switzerland)*, **18**. <https://doi.org/10.3390/s18051353>.
- 71 Wang, L., Song, J., Sai, Y. and Wang, H. (2019) Crack Width Analysis of Reinforced Concrete Using FBG Sensor. *IEEE Photonics Journal*, **11**. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2891267>.
- 72 Minutolo, V., Cerri, E., Coscetta, A., Damiano, E., Cristofaro, M.D., Di Gennaro, L., Esposito, L., Ferla, P., Mirabile, M., Olivares, L. and Zona, R. (2020) NSHT: New Smart Hybrid Transducer for Structural and Geotechnical Applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, **10**. <https://doi.org/10.3390/app10134498>.
- 73 Leffers, L., Locmelis, J., Bremer, K., Roth, B. and Overmeyer, L. (2021) Optical Bend Sensor Based on Eccentrically Micro-Structured Multimode Polymer Optical Fibers. *IEEE Photonics Journal*, **13**. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3111298>.
- 74 Yang, J., Zou, F., Guan, C., Ye, P., Gao, S., Zhu, Z., Li, P., Shi, J., Yang, J. and Yuan, L. (2022)



- Two-Dimensional Vector Bending Sensor Based on a Hole-Assisted Three-Core Fiber Coupler. *Optics Letters*, **47**, 5953. <https://doi.org/10.1364/ol.472178>.
- 75 Di Gennaro, L., Damiano, E., De Cristofaro, M., Netti, N., Olivares, L., Zona, R., Iavazzo, L., Coscetta, A., Mirabile, M., Giarrusso, G.A., D'Ettore, A. and Minutolo, V. (2022) An Innovative Geotechnical and Structural Monitoring System Based on the Use of NSHT. *Smart Materials and Structures*, **31**. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac5fc6>.
- 76 Leffers, L., Roth, B. and Overmeyer, L. (2022) Polymer Optical Bend Sensor Based on Eccentric Fiber Bragg Gratings for 3D Shape Detection. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.2609764>.
- 77 Arifin, A., Rusyam, N.I., Lebang, A.K., Abdullah, B. and Tahir, D. (2021) High Sensitivity and Resolution Sensor Plastic Optical Fiber for Determining Compressive and Tensile Tensor Concrete Applications. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1763/1/012004>.
- 78 Kwong, K.Z., Udos, W., Lim, K.-S., Lee, F.W., Tan, C.G., Samion, M.Z. and Ahmad, H. (2022) Spectral Analysis for Tilted Fiber Bragg Gratings in the Corrosion Detection for Concrete Structure. *Optica Applicata*, **52**, 429–439. <https://doi.org/10.37190/oa220309>.
- 79 Eickhoff, W. and Ulrich, R. (1981) Optical Frequency-Domain Reflectometry in Single-Mode Fibers. *Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, OSA. <https://doi.org/10.1364/ofc.1981.wf3>.
- 80 Bao, X. and Chen, L. (2012) Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, MDPI AG, **12**, 8601–8639. <https://doi.org/10.3390/s120708601>.