

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный
исследовательский центр
Уральского отделения
Российской академии наук
(ПФИЦ УрО РАН)

614990, г. Пермь, ул. Ленина, 13а
Тел. (342) 212-60-08, факс (342) 212-93-77
E-mail: psc@permisc.ru, http: //www.permisc.ru
ИНН 5902292103, КПП 590201001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН
«Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук»
д.ф.-мат.член корреспондент РАН



/ О.А. Плехов

14 апреля 2025 г.

№ _____
на № _____ от _____

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук»
(филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН)
по диссертации Сероваева Григория Сергеевича
"Механические аспекты измерения деформаций точечными
и распределенными волоконно-оптическими датчиками"
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук "Механические аспекты измерения деформаций точечными и распределенными волоконно-оптическими датчиками" выполнена в лаборатории моделирования отдела комплексных проблем механики деформируемых твердых тел Института механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН) – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).

Соискатель Сероваев Григорий Сергеевич в 2013 г. окончил ФГБОУ ВПО "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по направлению «Механика и математическое моделирование», квалификация «Магистр».

В период подготовки диссертации Сероваев Г.С. обучался в очной аспирантуре Института механики сплошных сред УрО РАН по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела (01.07.2013 – 30.06.2017) и работал младшим научным сотрудником (2013 – 2017 гг.), исполняющим обязанности младшего научного сотрудника (2017 г.), младшим научным сотрудником (2017 – 2023 гг.) лаборатории моделирования, младшим научным сотрудником (2023 – 2024 гг.) лаборатории механики функциональных материалов отдела комплексных проблем механики деформируемых твердых тел, младшим научным сотрудником (2024 – наст. время) лаборатории интеллектуального мониторинга ИМСС УрО РАН.

Удостоверение № 47 о сдаче кандидатских экзаменов и справка № 117700\6546-202 об обучении в аспирантуре выданы 24 марта 2025 г. ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН". Во время обучения Сероваев Г.С. получил следующие оценки за кандидатские экзамены по специальности 1.1.8 (01.02.04): иностранный (английский) язык – отлично, история и философия науки – хорошо, механика деформируемого твёрдого тела – отлично.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, академик РАН, ведущий научный сотрудник ИМСС УрО РАН Матвеев Валерий Павлович – представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

1. Актуальность темы диссертационной работы.

Измерение деформаций является одной из ключевых задач при мониторинге механического состояния конструкций. В последние десятилетия возрастающее внимание уделяется волоконно-оптическим датчикам (ВОД), как точечным — на основе волоконных брэгговских решёток, так и распределённым — на основе рэлеевского рассеяния. Их востребованность обусловлена рядом преимуществ по сравнению с другими датчиками деформаций. На основе анализа литературных источников показано, что актуальность заявленной темы определяется необходимостью комплексного анализа механических аспектов измерения деформаций с использованием точечных ВОД на брэгговских решётках и распределённых ВОД на основе рэлеевского рассеяния, встроенных в материал или фиксированных на его поверхности, с целью развития методов измерения деформаций и обеспечения обоснованного и надёжного применения ВОД в практических приложениях.

2. Новизна и практическая значимость полученных результатов.

Научная новизна диссертационной работы определяется: новым алгоритмом измерения деформаций расположенными на одном оптическом волокне точечными датчиками на брэгговских решётках и распределёнными датчиками на обратном рэлеевском рассеянии на всех зонах оптического волокна; результатами экспериментов, демонстрирующими в течение длительного времени стабильность показаний волоконно-оптических датчиков на основе ВБР при различных температурах и влажности и работоспособность ВОД, встроенных в различные материалы; новой моделью и алгоритмом для расчета напряжённо-деформированного состояния и оценки концентрации напряжений в окрестности оптического волокна, встроенного в полимерные композитные материалы; численной методикой оценки погрешности вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками на брэгговских решётках, встроенными в материал, фиксируемыми на поверхности материала, образующими розетки, встроенные в материал; новыми результатами численных и экспериментальных исследований по измерению градиентных полей деформаций и разработанными рекомендациями по выбору параметров распределённых ВОД.

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

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований.

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

4. Ценность научных работ соискателя ученой степени.

Результаты, изложенные в научных работах автора, внесли вклад в развитие методов измерения деформаций точечными и распределёнными ВОД. Проведенный анализ литературы позволил определить основные проблемы, связанные с использованием точечных и распределённых ВОД, требующие детального изучения. Демонстрация долгосрочной стабильности показаний ВОД на брэгговских решетках в различных климатических условиях даёт определенные гарантии их надежного использования в разных условиях эксплуатации.

Описание и предложенное решение проблемы измерения деформаций с помощью распределенного ВОД при наличии в измерительном оптическом волокне ВБР обеспечивает возможность совместного использования и совмещения достоинств обеих измерительных систем. Проведенные исследования о возможности встраивания оптического волокна в различные материалы с сохранением его целостности и работоспособности, а также изучение влияния встроенного оптического волокна на внутреннюю структуру слоистых композиционных материалов позволили построить модели объёма материала с внедренным оптическим волокном, учитывающие различные варианты компоновки композитного материала. Расчеты напряжённо-деформированного состояния с использованных построенных моделей позволили выявить наиболее опасные варианты нагружения, приводящие к наибольшей концентрации напряжений, а также получить оценки погрешности вычисления деформаций при использовании допущения об одноосном напряженном состоянии на основе предложенного алгоритма. Исследования по измерению градиентных распределений деформаций позволили сформулировать рекомендации по выбору параметров распределённых ВОД, использование которых обеспечивает минимальный уровень погрешности измерения деформаций. Результаты решения прикладных задач по измерению технологических деформаций и обнаружению дефектов продемонстрировали уникальные возможности, которые предоставляют волоконно-оптические датчики.

5. Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

Основное содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 35 публикациях, в том числе 12 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК и/или индексируемые в базах данных Web Of Science, Scopus:

1. **Сероваев Г.С.**, Кошелева Н.А. Исследование стабильности показаний волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках при различных климатических условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 101-109.
2. Matveenko V., **Serovaev G.** Distributed strain measurements based on Rayleigh scattering in the presence of fiber bragg gratings in an optical fiber // Photonics. – 2023. – Vol. 10, № 8. – Art. id. № 868.
3. Matveenko V., **Serovaev G.**, Kosheleva N., Fedorov A. Numerical and experimental analysis of the reliability of strain measured by surface-mounted fiber-optic sensors based on Bragg gratings // Structural Control and Health Monitoring. – 2022. – Vol. 29, № 12. – Art. id. № e3142.
4. Matveenko V., Kosheleva N., **Serovaev G.**, Fedorov A. Measurement of gradient strain fields with fiber-optic sensors // Sensors. – 2022. – Vol. 23, № 1. – Art. id. № 410.
5. Matveenko V., Kosheleva N., **Serovaev G.** Damage detection in materials based on strain measurements // Acta Mechanica. – 2021. – Vol. 232, № 5. – P. 1841-1851.
6. Matveenko V., Kosheleva N., **Serovaev G.**, Fedorov A. Analysis of reliability of strain measurements made with the fiber Bragg grating sensor rosettes embedded in a polymer composite material // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 15. – Art. id. № 5050.
7. **Serovaev G.S.**, Kosheleva N.A. The study of internal structure of woven glass and carbon fiber reinforced composite materials with embedded fiber-optic sensors // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2020. – Vol. 14, № 51. – P. 225-235.
8. Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., **Serovaev G.S.** Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // Composite Structures. – 2020. – Vol. 239. – Art. id. № 111844.
9. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., **Serovaev G.S.**, Fedorov A.Yu. Numerical analysis of the strain values obtained by FBG embedded in a composite material using assumptions about uniaxial stress state of the optical fiber and capillary on the Bragg grating // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2019. – Vol. 13, № 49. – P. 177-189.

10. Matveenko V.P., Shardakov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., **Serovaev G.S.**, Spaskova E.M., Shipunov G.S. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material // Structural Control and Health Monitoring. – 2018. – Vol. 25, № 3. – Art. id. № e2118.

11. Матвеев В.П., Кошелева Н.А., **Сероваев Г.С.** Экспериментальные и теоретические результаты, связанные с измерением деформаций, встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2021. – № 6. – С. 3-15.

12. Аношкин А.Н., Воронков А.А., Кошелева Н.А., Матвеев В.П., **Сероваев Г.С.**, Спаскова Е.М., Шардаков И.Н., Шипунов Г.С. Измерение неоднородных полей деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2016. – № 5. – Р. 42-51.

Перечисленные выше публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают основные положения всех содержательных глав диссертации. Первая глава [1, 2], Вторая глава [7-8], третья глава [3-4, 6, 8-12], четвертая глава [5, 11].

6. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

Автор диссертационной работы провел анализ современного состояния исследований по теме работы, в частности, был проведен анализ существующих подходов к изучению влияния встроенного оптического волокна на напряжённое состояние материала в его окрестности, в том числе при формировании технологического дефекта – смоляного кармана. Также проанализированы проблемы, связанные с достоверностью измерения деформаций встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками при различных вариантах напряжённо-деформированного состояния и неоднородном распределении деформаций вдоль оптического волокна (частично изложено во вводной части работ [3, 4, 6–9, 11]).

Автором разработана оснастка и план проведения экспериментальных исследований стабильности показаний ВОД на основе брэгговской решётки в разных климатических условиях (изложено в разделе 1 работы [1]). Выполнение экспериментов, демонстрирующих стабильность показаний волоконно-оптических датчиков деформаций при разных климатических условиях в течение длительного времени и обработка результатов измерений осуществлялись совместно с соавтором (изложено в разделе 2 работы [1]). Самостоятельно разработал алгоритм, обеспечивающий измерение деформаций распределёнными волоконно-оптическими датчиками на основе рэлеевского рассеяния на всей длине оптического волокна, при наличии в измерительном волокне одной или нескольких волоконных брэгговских решёток (изложено в разделе 3 работы [2]). Автором проведено численное моделирование напряжённо-деформированного состояния в окрестности оптического волокна, встроенного в слоистые полимерные композиционные материалы и совместно с научным руководителем проведён анализ полученных результатов (изложено в разделах 2–3 работы [8]). Совместно с руководителем разработана численная методика оценки погрешности вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках при использовании допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне датчика (изложено в разделе 4 работы [8] и разделе “Numerical analysis of strains, calculated based on embedded fbg measurements” работы [9]). Совместно с соавторами продемонстрировано использование разработанной численной методики при оценке погрешности измерения деформаций с помощью встроенных и располагаемых на поверхности ВОД (изложено в разделе 3 работы [6], разделе 4 работы [11], разделе 2 работы [3], разделе 4 работы [8] и разделе “Numerical analysis of strains, calculated based on embedded fbg measurements” работы [9]). Автор принимал активное участие в подготовке, проведении, обработке результатов экспериментов, проведении численного моделирования, на основе которых совместно с соавторами получены результаты по оценке работоспособности ВОД встроенных в материал (частично изложено в разделе “FBG SPECTRA AFTER MANUFACTURING PROCESS” работы [7], разделе 2 работы

[11]), измерению градиентных полей деформаций (частично изложено в разделе 3 работы [10], разделах 2-3 работы [12], разделах 2,4 работы [4]), приложениям ВОД для измерения технологических деформаций (частично изложено в разделе 6 работы [10] и разделе 2 работы [11]), регистрации дефектов (изложено в разделах 2-3 работы [5]). Автором Предложены рекомендации по выбору параметров распределенных ВОД. Подготовка научных публикаций осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами.

7. Научная специальность, которой соответствует диссертация.

Представленная диссертационная работа соответствует формуле специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела "Изучение закономерности процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов различной природы, а также напряженно деформированное состояние твердых тел из этих материалов, при механических, тепловых, радиационных, статических и динамических воздействиях в пассивных и активных, газовых и жидких средах и полях различной природы", а именно следующим областям исследования из паспорта специальности: 13. Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях. 12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела. 4. Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов.

Диссертационная работа Сероваева Григория Сергеевича "Механические аспекты измерения деформаций точечными и распределенными волоконно-оптическими датчиками" представляет собой законченное исследование важных научных проблем, удовлетворяющее требованиям пп.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Диссертационная работа Сероваева Григория Сергеевича "Механические аспекты измерения деформаций точечными и распределенными волоконно-оптическими датчиками" обсуждена и одобрена на заседании Научного семинара Института механики сплошных сред УрО РАН под руководством академика РАН Матвеевко В.П. 02 апреля 2025 г., протокол № 10/25.

Присутствовало на заседании 58 человек, из них 13 докторов наук и 26 кандидатов наук. Результаты открытого голосования научных работников ИМСС УрО РАН: "за" – 58 чел.; "против" – 0 чел.; "воздержалось" – 0 чел.

Директор

Института механики сплошных сред УрО РАН:
доктор физико-математических наук,
доцент Мизев Алексей Иванович

/ Мизев А.И.

Председатель заседания Научного семинара

Института механики сплошных сред УрО РАН:
Заведующий лабораторией физических основ прочности,
доктор физико-математических наук,
профессор Наймарк Олег Борисович

/ Наймарк О.Б.

Личную подпись
удостоверяю
Специалист по кадрам

