

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ*

И.Н. Шардаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Н.С. Созонов, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

Р.В. Цветков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Использованы экспериментальные и теоретические методы и подходы, обеспечившие разработку и создание автоматизированных систем деформационного мониторинга с использованием волоконно-оптических элементов. Проведены экспериментально-теоретические работы на различном пространственном масштабе: от чувствительного элемента до протяженного объекта исследования. Описаны математические модели (в рамках линейной теории упругости) механического взаимодействия элементов волоконно-оптических датчиков деформаций как между собой, так и с поверхностью исследуемого объекта. Эти модели позволили осуществить выбор параметров для экспериментов на балке равного сопротивления, определить способы крепления волокна к подложке (с определением калибровочных коэффициентов) и подложки к исследуемой поверхности; установить уровень температурных деформаций в чувствительном элементе ВОД. Экспериментальные исследования термомеханических характеристик проведены как для отдельных элементов ВОД (решетка Брэгга, клеевые соединения), так и для ВОД в целом при силовом и температурном воздействиях. Результаты этих исследований позволили установить такие параметры ВОД, как относительная точность, чувствительность и «уход нуля», а также конструктивную схему волоконно-оптического датчика деформации, которая позволяет регистрировать деформации на исследуемой поверхности.

Ключевые слова: деформационный мониторинг, волоконно-оптический датчик, решетка Брэгга, балка равного сопротивления.

Один из эффективных способов обеспечения безопасной эксплуатации конструкций в настоящее время – использование автоматизированных систем деформационного мониторинга. Важным явля-

ется наличие математической модели, описывающей особенности деформационных процессов в элементах контролируемого объекта. Эта модель должна адекватно описывать деформационное взаи-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (проект № 13-08-96069).

модействие объекта с системой внешних воздействий, а также деформационное взаимодействие применяемых датчиков с объектом.

Наиболее перспективные варианты построения систем мониторинга основаны на волоконно-оптических датчиках (ВОД), которые имеют ряд преимуществ: устойчивость к электромагнитным излучениям (и к радиации), отдаленность от регистрирующей аппаратуры, возможность подключения нескольких датчиков на одной линии. Современные ВОД основаны на различных физических принципах и позволяют измерять многие физические параметры. В данной работе исследуются волоконно-оптические чувствительные элементы на основе решеток Брэгга [1]. Деформационное воздействие на решетку Брэгга приводит к изменению длины волны отраженного от решетки сигнала, который фиксируется специальной аппаратурой.

В рамках проекта можно выделить экспериментально-теоретические работы в различном масштабе: на уровне чувствительного элемента, на уровне крепления волокна с корпусом датчика [2], на уровне взаимодействия датчика с объектом исследования [3], на уровне взаимодействия объекта мониторинга с внешними факторами [4, 5]. В данной статье остановимся на результатах, полученных для первых уровней.

Исследование термомеханических свойств решеток Брэгга

Для тарировки волоконно-оптических решеток Брэгга была проведена серия экспериментов, которые включали в себя измерения длин волн решетки Брэгга в зависимости от температуры, а также в результате деформации волокна под действиями механической нагрузки. Измерения длин волн решеток осуществлялись при помощи интеррогатора Fiber Sensing FS 2200. Его абсолютная точность составляет ± 2 пм при частоте опроса 1 Гц в диапазоне длин волн от 1500 до 1600 нм. В эксперименте использовалось волокно с 5

решетками Брэгга, имеющих следующие длины волн ($\lambda_1 = 1510$ нм, $\lambda_2 = 1530$ нм, $\lambda_3 = 1550$ нм, $\lambda_4 = 1570$ нм, $\lambda_5 = 1590$ нм).

В первой серии экспериментов исследуемое волокно с решетками Брэгга помещалось в герметичный сосуд с воздухом, который в свою очередь располагался в термостате с жидкостью. В качестве жидкости использовалась вода, которая подогревалась нагревателем и равномерно перемешивалась. Контроль за температурой жидкости производился с помощью поверенного ртутного градусника с точностью $0,1$ °С, который помещался в различные части термостата. Измерение температуры воздуха в сосуде осуществлялось с помощью двух цифровых датчиков. В процессе измерений производился нагрев воды от $+4$ °С до 90 °С с шагом около 10 °С. На основании экспериментов были получены зависимости $\lambda_i(T)$ для каждой из решеток, которые интерполировались полиномами второй степени. Была произведена оценка доверительного интервала с помощью критерия Стьюдента для достоверности $0,95$ в диапазоне температур от $+5$ до $+95$ °С. Он оказался $\pm 0,002$ нм, что соответствует температуре $\pm 0,2$ °С и заявленной точности прибора при частоте опроса 1 Гц.

Для определения механических свойств было исследовано растяжение участка волокна без оболочки с решетками Брэгга (с одного края волокно закреплялось, а с другого края подвешивались грузы, предварительно взвешенные, различной массы). Таким образом, производилось силовое нагружение волокна и в зоне решеток создавалось равномерное напряженно-деформированное состояние (НДС). Растяжение волокна контролировалось методом фотограмметрии при помощи 2 камер: рядом с волокном в районе каждой из камер располагались неподвижные метки, относительно которых смещалось волокно, которое тоже имело метки. Расстояние между неподвижными метками было фиксировано и составляло порядка 1,5 м. Данный метод позволяет производить измерения положения метки

на волокне относительно неподвижной метки с точностью 10–15 мкм в поле зрения камеры, которое составляло 5–6 мм. Таким образом, метод позволяет измерять деформации от 10 до 4000 мкм/м. Это диапазон перекрывает потенциально возможный диапазон волоконного датчика деформации, составляющий 2000 мкм/м.

В процессе измерения последовательно изменялась масса нагрузки (снимались и устанавливались грузы различной массы) и после прекращения видимых колебаний производились измерения деформации с помощью камер и изменения частот решеток. В ходе испытания груз постепенно увеличивался до значений, соответствующих деформациям 3000 мкм/м.

В результате экспериментов с достоверностью 0,95 была получена оценка модуля упругости материала $72,3 \pm 0,3$ ГПа, что близко к значению модуля упругости для кварца, а также получены коэффициенты, равные отношению изменения длины волны решетки $\Delta\lambda/\lambda$ к деформации волокна ϵ без оболочки:

$$K1 = 0,7849 \pm 0,0031 (\lambda=1510 \text{ нм});$$

$$K2 = 0,7852 \pm 0,0033 (\lambda=1530 \text{ нм});$$

$$K3 = 0,7850 \pm 0,0034 (\lambda=1550 \text{ нм});$$

$$K4 = 0,7849 \pm 0,0033 (\lambda=1570 \text{ нм});$$

$$K5 = 0,7846 \pm 0,0033 (\lambda=1590 \text{ нм}).$$

Указанные коэффициенты можно использовать в дальнейшем при изготовлении ВОД деформации.

Исследование взаимодействия элементов ВОД с подложкой датчика и поверхностью исследуемого объекта

Ранее в работе [2] с помощью моделирования взаимодействия датчика деформации с поверхностью исследуемого объекта было показано, что на его показания влияет характер закрепления как волокна в датчике, так и самого датчика (подложки) к объекту исследования.

Например, в ходе численных экспериментов было установлено, что при приклейке волокна к металлической подложке датчика важное значение имеет расстояние от волокна до поверхности и

свойств клея. Это проявляется в увеличении зоны вдоль края приклейки, где деформация на волокно передается не полностью, поскольку модуль упругости клея значительно ниже кварца. В средней зоне приклейки можно считать, что деформация полностью передается на волокно.

Так как свойства клея играют важную роль, были проведены экспериментальные исследования термомеханических свойств полимерных материалов, использованных в качестве клеевых элементов. Для клеев различных марок на установке NETZSCH DMA 242C были получены зависимости динамических модулей упругости от температуры в диапазоне от 20 до 150 °С. Тем самым были оценены границы применимости датчиков на их основе.

Экспериментальное исследование деформационных процессов элементов ВОД было осуществлено как с помощью балки равного сопротивления, которая позволяет реализовать однородную деформацию, так и с помощью испытательной установки Zwick.

Выбор наиболее рациональных параметров балки равного сопротивления и характеристик материала, обеспечивающих необходимый уровень упругого деформирования, был осуществлен на основе аналитического решения в рамках теории сопротивления материалов (балочное приближение) и анализа результатов численных решений в рамках трехмерной теории упругости. Эти результаты позволили оценить область балки, в пределах которой продольные деформации имеют различие не более 1%. В этой области и закреплялся датчик. Был осуществлен большой цикл экспериментально-теоретических исследований, позволивший оценить влияние различных факторов на значение калибровочного коэффициента. Выделены следующие значимые факторы: геометрия и материал подложки, на которой располагается датчик; схема клеевого соединения и физико-механические свойства клея, объединяющего волоконно-оптический датчик с поверхностью

подложки; структурная схема соединения подложки с поверхностью балки равного сопротивления; неоднородность физико-механических свойства волокна в поперечном сечении.

При испытаниях на установке Zwick растягивались алюминиевые пластины (Д16АТ) с 2 дельта-розетками из ВОД деформации (по одной розетке с каждой стороны пластины). Дельта-розетка состояла из трех ВОД деформации ориентированных под углами 0, 60 и 120 градусов. Размеры пластин: длина – 302÷305 мм, толщина 0,87÷0,92 мм, ширина 52,8÷53,3 мм. Для термокомпенсации применялся ВОД, расположенный на подобной ненагруженной пластине. В ходе испытаний регистрировалась деформация образца при помощи экстензометра и ВОД. Затем осуществлялся перерасчет от показаний трех ВОД на розетке к главным деформациям и производилось сравнение с данными экстензометра. При однократном нагружении до деформации 2 500 мкм/м отличие показаний для разных датчиков составило 3,5%, 5,2%, 3,9% и 1,3%. При нескольких циклах нагружения отличия в показаниях несколько возрастали, что, по всей видимости, связано с ползучестью клея. Испытание на разрыв показало, что разрушение датчика происходит через разрыв волокна при измеряемой деформации более 6 000 мкм/м, при этом клеевое соединение

выдерживает приложенную нагрузку без видимых изменений.

Проведенные эксперименты показывают, что испытываемый метод приклейки волокна в дельта-розетки позволяет определять главные деформации с точностью 5%.

В ходе выполнения проекта разработана математическая модель (в рамках линейной теории упругости) механического взаимодействия элементов волоконно-оптических датчиков деформаций между собой и с поверхностью исследуемого объекта. Эта модель позволила осуществить выбор параметров для экспериментов на балке равного сопротивления, определить способы крепления волокна к подложке (с определением калибровочных коэффициентов) и подложки к исследуемой поверхности; установить уровень температурных деформаций в чувствительном элементе ВОД. Был произведен цикл экспериментальных исследований, который включал в себя исследование термомеханических характеристик как отдельных элементов ВОД (решетка Брэгга, клеевые соединения), так и ВОД в целом при силовом и температурном воздействии. Результаты этих исследований позволили установить такие параметры ВОД, как относительная точность, чувствительность и «уход нуля» и осуществить выбор конструктивной схемы датчика.

Библиографический список

1. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г. [и др.] Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. – 2005. – № 12. – С. 1085–1103.
2. Созонов Н.С. Особенности взаимодействия элементов волоконно-оптического датчика деформаций // Вестник молодых ученых ПГНИУ [Электронный ресурс]. – 2014. – № 4. – С. 283–290.
3. Созонов Н.С., Шардаков И.Н. Исследование возможностей применения волоконно-оптических датчиков для регистрации неоднородного поля деформаций // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – С. 47–50.
4. Matveenko V.P., Fedorova V.A., Shardakov I.N. Theoretical Justification of the Possibility of Constructing a Fiber-Optic Earth Surface Deformation Monitoring System // Mechanics of Solids. – 2013. – Vol. 4. – № 5. – P. 520–524.
5. Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Анализ распространения волн в подземных газопроводах применительно к задаче проектирования систем мониторинга // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6. – № 3. – С. 364–372.

**EXPERIMENTAL-THEORETICAL PRINCIPLES OF AUTOMATIC DEFORMATION
MONITORING SYSTEMS USING FIBER-OPTICAL ELEMENTS**

Shardakov I.N.¹, Sozonov N.S.², Tsvetkov R.V.¹

¹ *Institute of Continuous Media Mechanics of the UB of RAS*

² *Perm State University*

In the project the experimental and theoretical methods and approaches, which provided the development and creation of the automated deformation monitoring systems based on fiber-optical elements, are used. Experimental and theoretical studies on different scales were performed: from the sensing element to the extended monitoring object. Mathematical models (in the framework of the linear theory of elasticity) of the mechanical interaction of the elements of optical fiber sensors are both described: between each other and with the surface of the researched object. These models allowed carrying out the choice of parameters for experiments on the uniform-strength beam, to define the ways of fiber fastening to the substrate and the substrate to the researched object surface; to establish the level of temperature strains in the optical fiber sensor. The experimental studies of thermo mechanical characteristics were conducted for both: separate elements of the sensor (Bragg grating, glue joints), and for the fiber optical sensor in general under force and temperature influences. The results of these studies have established such sensor parameters as relative accuracy, sensitivity and "zero maintenance". It also established a constructive scheme of the fiber-optic strain sensor which allows recording the strains on the investigated surface.

Keywords: deformation monitoring, fiber optic sensor, Bragg grating, uniform-strength beam.

Сведения об авторах

Шардаков Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: shardakov@icmm.ru

Созонов Николай Сергеевич, аспирант, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: sozonov.nik@bk.ru

Цветков Роман Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, ИМСС УрО РАН; e-mail: flower@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.