УДК 539.3

И.Н. Шардаков, Н.А. Кошелева, Р.В. Цветков

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ВАРИАНТЫ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ

Одним из элементов, обеспечивающих получение значений деформаций на основе показаний волоконно-оптических датчиков деформаций на брэгговских решетках, является температурная компенсация. В настоящей работе рассматриваются два метода температурной компенсации. Экспериментальный метод температурной компенсации естественен и нагляден. Здесь рядом с датчиком деформации на исследуемом объекте размещен фрагмент материала исследуемого объекта с аналогичным датчиком деформаций. Разность сигналов с этих датчиков будет определять механические деформации. В работе обсуждаются варианты сокращения числа компенсационных датчиков. Экспериментально-теоретический метод основан на решении температурной краевой задачи и задачи о деформации при известном температурном воздействии. Результатом решения является деформация компенсационного датчика от изменения температуры.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик деформаций, температурная компенсация, температура, полимерный композиционный материал, ВОДД, ПКМ.

I.N. Shardakov, N.A. Kosheleva, R.V. Tsvetkov

Institute of Continuum Media Mechanics Ural Branch of Russian Academy
of Sciences, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL VARIANTS OF THERMAL COMPENSATION OF FIBER-OPTICAL STRAIN SENSORS

Temperature compensation is one of the elements that is provide the obtaining of strain values on the basis of readings from fiber-optical strain sensors on Bragg gratings. In this paper two methods of temperature compensation are considered. The experimental method of temperature compensation is natural and obvious. Here, next to the strain sensor on the investigated object, a fragment of the material of the investigated object with a similar strain sensor is placed. The difference of signals from these sensors will determine mechanical strains. The paper discusses options for reducing the number of compensation sensors. The experimental-theoretical method is based on the solution of the temperature boundary value problem and the strain problem for a known temperature effect. The result of the solution is the strain of the compensation sensor from the temperature change.

Keywords: fiber-optical strain sensors, temperature compensation, temperature, polymer composite material, FOSS, PCM.

В настоящее время волоконно-оптические датчики успешно конкурируют, а в некоторых случаях вытесняют традиционные электронные устройства для измерения физических величин. Это происходит благодаря уникальным свойствам, которыми обладают волоконно-оптические элементы: нечувствительность к электромагнитному воздействию, в том числе к радиации; отсутствие необходимости обеспечения электропитания в непосредственной близости от датчика; возможность работы в широком температурном диапазоне. Волокно является одновременно и датчиком, и каналом передачи информации, что обеспечивает возможность успешного использования волоконно-оптических систем для объектов большой протяженности (трубопроводов, крупномасштабных конструкций и природных объектов). Волоконно-оптические датчики базируются на использовании различных физических эффектов.

В мировой литературе особое внимание уделяется изучению поведения волоконно-оптических датчиков деформации (ВОДД) при структурном мониторинге различных объектов в режиме реального времени. Особое внимание уделено показаниям ВОДД при различных температурах, а также получению независимых измерений деформации и температуры с использованием встроенной волоконной брэгговской решетки (ВБР) в полимерных образцах. Авторами статьи [1] экспериментально исследованы чувствительные характеристики ВБР, встроенных в полимерный композиционный материал (ПКМ). Для оценки точности в качестве контроля были использованы два верхних/нижних датчика ВБР, связанных с поверхностью. Результаты показывают, что длина волны встроенной ВБР изменяется соответственно изменению температуры или деформации во время экспериментов: реакции на температуру и статические нагрузки изменяются линейно, что хорошо согласуется с характеристиками поверхностно установленных ВБР. При этом частотные отклики на низкой скорости воздействия дают одинаковую резонансную частоту, но меньшую амплитуду по сравнению с частотами поверхностно установленных ВБР. Эта работа подтверждает, что встроенный датчик ВБР может эффективно и надежно контролировать внутренние условия композитных материалов благодаря преимуществам точного измерения, небольшого размера, легкой интеграции и т. д. Сделан вывод о том, что встроенные датчики ВБР имеют широкие перспективы применения в области интеллектуальных композитов.

В работе [2] представлен новый метод получения независимых измерений деформации и температуры с использованием встроенной ВБР в полимерных образцах для испытаний на растяжение. Перекрестная чувствительность ВБР к деформации и температуре была разделена с использованием двух одномодовых датчиков ВБР, которые были встроены в материал образца под определенным углом между ними. Показано, что при изменении температуры оба датчика ВБР показывают один и тот же сигнал. Однако для любой приложенной нагрузки характеристика сигнала различна, что вызвано различными уровнями деформации, действующими в каждом датчике. В статье представлены уравнения для расчета независимо для деформации и температуры. Этот многопараметрический метод измерения был применен к эпоксидному образцу на растяжение. Образец был протестирован в однонаправленной машине для испытаний на растяжение с термостатическим шкафом. Для этой пары «материал–датчик» была выполнена полная калибровка (температура и деформация) и была достигнута ошибка калибровки $<1\%$. За этим следовали испытания на температуру и деформацию, где две стадии нагружения/деформации ($\varepsilon = 0,30\%$ и $\varepsilon = 0,50\%$) были применены при непрерывном изменении температуры от 40 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдалась хорошая согласованность между теоретическими результатами и экспериментальными данными с учетом калибровки. Предложенный метод применим для получения точной деформации и температуры в полимерах при испытании на растяжение или на усталостные испытания при растяжении. Представлены и проанализированы два различных протокола калибровки.

В статье [3] представлен и изучается датчик давления со встроенной волоконной ВБР. Датчики давления являются важными устройствами для измерения давления и оценки безопасности в современном промышленном производстве и инженерном применении. В датчике давления со встроенной ВБР используются диафрагма и кантилевер в качестве чувствительного элемента. Две ВБР соединены соответственно на верхней и нижней поверхностях кантилевера, а разность между двумя ВБР используется в качестве измерительного сигнала. Таким образом улучшается чувствительность измерения давления и избегается любое влияние температуры поперечного сечения. Экспериментальные результаты показывают, что этот датчик имеет чувствительность $339,956\text{ мкм/МПа}$ и коэффициент линейной подгонки

99,997 % в диапазоне давлений от 0 до 10 МПа, а максимальная ошибка измерения давления, вызванная в диапазоне температур от 5 до 70 °С, составляет 0,93 %, поэтому эффект от температурной компенсации весьма заметен. Такой датчик давления со встроенной ВБР может быть широко применен для квазираспределенного долгосрочного статического мониторинга в режиме реального времени или мониторинга динамического давления жидкости или газа в промышленном производстве.

В исследовании [4] обсуждаются экспериментальные данные о показаниях ВБР до и после нескольких месяцев испытаний в климатической камере. Приведены результаты лабораторных испытаний на полноразмерных частях летательных аппаратов. В работе показано, что на одной из внедренных линий одна ВБР была использована для температурной компенсации. Практическое применение ВБР в работе [5] было рассмотрено на примере безопасной эксплуатации моста, поддерживаемого при помощи тросов (вантовый мост). Для долгосрочного мониторинга были предложены датчики нового типа в виде силовых колец с ВБР. Датчики ВБР крепились к разработанным кольцам с использованием болтов для фиксации датчиков так, что возможна замена сенсорных элементов ВБР, если датчики ВБР выйдут из строя во время длительного обслуживания. Выпуклые платформы на верхней и нижней поверхностях эластомера спроектированы таким образом, чтобы минимизировать количество датчиков ВБР на поддерживающих силовых тросах (вантов). Теоретические и экспериментальные исследования проводятся для проверки возможностей и эффективности предлагаемого силового кольца с ВБР для контроля вантов (прямолинейных тросов) и температурной компенсации. Предлагается формула для компенсации температурного эффекта. Это новое испытательное кольцо с ВБР затем используется в реальной конструкции арочного моста для контроля вантов. Показано, что новый тип испытательного кольца с ВБР имеет более высокую точность при получении измерений с вантов, а температурный эффект можно успешно компенсировать.

Таким образом, одним из элементов, обеспечивающих точное получение значений деформаций на основе показаний волоконно-оптических датчиков деформаций на брэгговских решетках, является температурная компенсация.

1. Задача термокомпенсации

Температурная компенсация для волоконно-оптических датчиков необходима, если измерения осуществляются при температурах, не соответствующих температуре тела в момент установки датчика. Это следует из физических явлений, описывающих отклик параметров брэгговской решетки на температурно-деформационное воздействие. Брэгговская решетка, сформированная в поперечном сечении оптического волокна, отражает часть широкополосного спектра лазерного излучения. Структурная схема брэгговской решетки представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема брэгговской решетки в оптическом волокне

Основная длина волны отраженного спектра λ^* зависит от показателя преломления оптического волокна n и длины периода структуры решетки L . Эта зависимость определяется соотношением:

$$\lambda^* = 2nL. \quad (1)$$

После несложных преобразований с использованием соотношения (1) можно получить известное [6] выражение:

$$\Delta\lambda_{Br} = 2n\lambda \left(\left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \right), \quad (2)$$

определяющее зависимость изменения длины волны отраженного спектра $\Delta\lambda^*$ от продольной деформации оптического волокна ε и от изменения температуры ΔT в линейном приближении. В правой части

этого выражения: P_{11} , P_{12} – коэффициенты Поккельса упругооптического тензора; α – коэффициент линейного температурного расширения кварцевого стекла; ν – коэффициент Пуассона. Следует отметить, что в выражении (2) ε есть деформация, вызванная механическим воздействием.

На рис. 2 представлена структурная схема регистрации деформации с помощью волоконно-оптического датчика на основе брэгговской решетки.

Рис. 2. Структурная схема регистрации деформации с помощью волоконной брэгговской решетки

Волоконно-оптический датчик, взаимодействуя деформационно с материалом исследуемого объекта, позволяет с помощью интеррогатора регистрировать изменение длины волны отраженного спектра $\Delta\lambda^*$. Но эта регистрируемая величина, как это следует из соотношения (2), определяется не только деформацией ε , вызванной механическим воздействием, но и изменением температуры: $\Delta T = T(t) - T_0$. Здесь $T(t)$, T_0 – температуры системы «волоконно-оптический датчик – исследуемый материал в окрестности датчика» соответственно в момент времени t и в момент установки датчика на исследуемый объект. Таким образом, регистрация изменения отраженного спектра в условиях изменяющихся температур не позволяет непосредственным образом определить деформацию, вызванную в системе «волоконно-оптический датчик – исследуемый материал в окрестности датчика» механическим воздействием. А для определения напряженного состояния и

оценки прочности необходима именно информация о деформации, вызванной механическим воздействием.

Ниже рассмотрены алгоритмы двух методов, позволяющих осуществлять выделение из общего регистрируемого изменения длины волны отраженного спектра той части, которая определяется изменением температуры. Эти алгоритмы опираются на свойство аддитивности общего регистрируемого сигнала по отношению к откликам на механическое и температурное воздействие. Следует отметить, что свойство аддитивности выполняется, если деформационное состояние элементов системы «волоконно-оптический датчик – исследуемый материал в окрестности датчика» описывается в рамках линейной теории упругости.

2. Экспериментальный способ температурной компенсации

Экспериментальный метод температурной компенсации является естественным и наглядным. Обычно рядом с местом расположения датчика деформации на исследуемом объекте размещают фрагмент материала исследуемого объекта с наклеенным на нем идентичным датчиком деформации. При этом должен быть соблюден ряд условий: способ крепления датчиков должен быть идентичным, температуры в момент фиксации обоих датчиков должны быть одинаковыми. В процессе измерений наблюдатель получает два сигнала: один – с основного датчика и второй – с компенсационного. Образы этих сигналов представлены на рис. 3. Разность этих сигналов представляет собой график эволюции деформации, обусловленной чисто механическим воздействием.

а

б

Рис. 3. Изменение температуры в окрестности основного и компенсационного волоконно-оптических датчиков (а) и результаты измерения деформации (б): с основного датчика $\varepsilon(t)$ (кривая 1), с компенсационного датчика $\varepsilon_T(t)$ (кривая 2), от механического воздействия $\varepsilon_M(T) = \varepsilon(t) - \varepsilon_T(T)$ (кривая 3)

Безусловно, данный метод предъявляет очень строгие требования к однородности температурного поля в окрестности расположения датчиков (как основного, так и компенсационного), что, в свою очередь, определяется скоростями изменения температурных полей в окрестности расположения датчиков. Неудобством этого метода является также необходимость использования компенсационного датчика в паре с каждым из основных датчиков, т.е. в этом случае требуется удвоенное число датчиков.

Избежать этого неудобства позволяет следующий подход. Необходимо экспериментальным путем независимо определить температурную реакцию (тарировочную зависимость) одного компенсационного датчика в широком температурном диапазоне. Для этого температурный компенсатор помещается в термокамеру, где регистрируется зависимость деформации и температуры от времени в заданном интервале температур. Примеры этих зависимостей приведены на рис. 4. По этим графикам строится универсальная тарировочная зависимость между температурной деформацией и приращением температуры для данного типа датчика. Эта зависимость представлена на рис. 5.

Рис. 4. Графики изменения во времени температуры в термокамере $t(T)$ и деформации (ε) для компенсационного датчика

Если в измерительной системе используются только датчики данного типа, полученные результаты могут быть использованы для

каждого из этих датчиков. Таким образом, единственная полученная термокомпенсационная зависимость обеспечивает температурную компенсацию всех установленных датчиков одинакового типа. Если в измерительной системе используются датчики различных типов, то ком-

Рис. 5. Универсальная тарифовочная зависимость для термокомпенсации

пенсационных зависимостей должно быть несколько. Данный прием целесообразно использовать, когда исследуемая конструкция находится в неоднородном температурном поле. При этом требование к однородности температурного поля в окрестности датчика в момент регистрации остается.

3. Экспериментально-теоретический способ температурной компенсации

Область сопряжения ВОД деформации с исследуемой поверхностью в масштабе характерных размеров датчика представляет собой конструкцию, состоящую из совокупности элементов, материал которых имеет различные физико-механические и теплофизические свойства.

Для получения термокомпенсационной зависимости подобных сложных пространственных конструкций можно воспользоваться математическим моделированием деформационного отклика этих конструкций на температурное воздействие, в том числе нестационарное. Это обстоятельство особенно важно для оценки характерных времен, при которых достигается однородность температурного поля в окрестности установки датчика.

Математическая постановка задачи состоит из температурной краевой задачи и задачи о деформационном отклике на температурное воздействие. Обе эти задачи формулируются для системы, состоящей

из ВОД деформации, совмещенного с фрагментом материала объекта исследования. Следует отметить, что вся эта система не испытывает внешнего механического воздействия. Далее эту систему будем называть температурным компенсатором.

Задача нестационарной теплопроводности для любой области $V^{(i)}$ включает в себя:

– уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T^{(i)}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = a^{(i)} \nabla^2 T^{(i)}(\mathbf{x}, t) + Q^{(i)}, \quad \mathbf{x} \in V^{(i)}; \quad (3)$$

– краевые условия:

$$T^{(i)}(\mathbf{x}, t) = T_1, \quad \mathbf{x} \in S^*, \quad S^* \in \bigcup_{k=1}^N S^{(k)}; \quad (4)$$

$$T^{(i)}(\mathbf{x}, T) = T^{(k)}(\mathbf{x}, T), \quad \mathbf{n}^{(i)} \cdot \lambda^{(i)} \text{grad} T^{(i)} = \mathbf{n}^{(k)} \cdot \lambda^{(k)} \text{grad} T^{(k)}, \quad \mathbf{x} \in S^{(i,k)};$$

– начальные условия:

$$T^{(i)}(\mathbf{x}, 0) = T_0, \quad \mathbf{x} \in V^{(i)}. \quad (5)$$

Здесь верхний индекс i определяет принадлежность к i -й области $V^{(i)}$; $V^{(i)}$ – область, занятая какой-либо из частей термокомпенсационного элемента, $T^{(i)}(\mathbf{x}, t)$ – температурное поле в i -й области в момент времени t в точке, соответствующей радиус-вектору $\mathbf{x}$; $a^{(i)}$ – коэффициент температуропроводности, $a^{(i)} = \kappa^{(i)} / c^{(i)} \rho^{(i)}$, κ , c , ρ – соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность.

Задача определения деформационного состояния для любой области $V^{(i)}$ температурного компенсатора включает в себя:

– уравнение равновесия:

$$\text{div} \boldsymbol{\sigma}^{(i)}(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in V^{(i)}; \quad (6)$$

– физические уравнения:

$$\boldsymbol{\sigma}^{(i)} = \Lambda^{(i)} \theta^{(i)} \mathbf{E} + 2M^{(i)} \boldsymbol{\varepsilon}^{(i)} - (3\Lambda^{(i)} + 2M^{(i)}) \Lambda^{(i)} \Delta T \mathbf{E}; \quad (7)$$

– геометрические соотношения:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(i)} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{U}^{(i)} + \left(\nabla \mathbf{U}^{(i)} \right)^* \right]; \quad (8)$$

$$\theta^{(i)} = \operatorname{div} \left(\mathbf{U}^{(i)} \right).$$

– краевые условия:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}^{(i)} \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(i)} &= 0, \quad \mathbf{x}^{(i)} \in S^{(*)}, \quad S^{(*)} \in \bigcup_{k=1}^N S^{(k)}; \\ \mathbf{U}^{(i)} &= \mathbf{U}^{(k)}, \quad \mathbf{x} \in S^{(i,k)}; \\ \mathbf{n}^{(i)} \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(i)} &= \mathbf{n}^{(k)} \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(k)}, \quad \mathbf{x} \in S^{(i,k)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Задачи нестационарной теплопроводности и деформационного состояния решаются численно методом конечных элементов с использованием программного средства ANSYS. Для численного решения поставленных задач необходима информация о значениях теплофизических и физико-механических параметров материалов, используемых в составе термокомпенсационного элемента.

В результате решения устанавливается зависимость температурной реакции компенсационного датчика в виде графика деформации компенсационного датчика ε_{TK} от изменения температуры: $\Delta T = T_1 - T_0$.

Описанный подход имеет ряд преимуществ перед чисто экспериментальными подходами. Параметрический анализ получаемых численных решений позволяет осуществить рациональный выбор конструктивных, геометрических и физико-механических параметров сопряжения волоконно-оптических датчиков деформации, обеспечивающих, в частности, минимальное время установления температурного поля (а значит, и деформации) в составных частях компенсационного элемента. Чем меньше время установления температуры, тем при больших скоростях изменения температурного поля удастся регистрировать значения деформации исследуемого объекта.

Заключение

В работе дается описание двух методов термокомпенсации экспериментального и экспериментально-теоретического. Отмечаются достоинства и недостатки методов и варианты их совершенствования.

Результаты исследований, представленные в подразделах 1–2, получены за счет средств РФФИ (проект №17-41-590684 p_урал_a).

Результаты исследований, представленные в подразделе 3, получены за счет средств Российского научного фонда (проект № 14-29-00172-П).

Список литературы

1. Sensing characteristics of FBG sensor embedded in CFRP laminate / X. Geng, M. Jiang, L. Gao, Q. Wang, Y. Jia, Q. Sui, L. Jia, D. Li // Meas. J. Int. Meas. Confed. – 2017. – Vol. 98. – P. 199–204.
2. Method for independent strain and temperature measurement in polymeric tensile test specimen using embedded FBG sensors / G. Pereira, M. McGugan, L.P. Mikkelsen // Polym. Test. – 2016. – Vol. 50. – P. 125–134.
3. A fiber bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure / M.-F. Liang, X.-Q. Fang, G. Wu, G.-Z. Xue, H.-W. Li // Optik – 2017. – Vol. 145. – P. 503–512.
4. Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring / I. García, J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrekue, M.A. Illarramendi, J. Villatoro // Sensors – 2015. – Vol. 15, No. 7. – P. 15494–15519.
5. Li X.X., Ren W.X., Bi K.M. FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation // Sensors Actuators, A Phys. – 2015. – Vol. 223. – P. 105–113.
6. Установка для исследования изменения наведенного преломления в волоконных световодах при высоких температурах / А. Божков, С. Васильев, О. Медведков, М. Греков, И. Королев // Приборы и техника эксперимента – 2005. – № 4. – С. 76–83.

Получено 15.11.17