

УДК 53.082.54

МЕТОД КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

М.Е. Ефимов^а, А.В. Волков^а, Е.В. Литвинов^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: spbefimovmikhail@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.02.18, принята к печати 27.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ефимов М.Е., Волков А.В., Литвинов Е.В. Метод контроля деформаций композитных конструктивных элементов с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 212–219. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219

Аннотация

Предмет исследования. Проведено исследование возможности регистраций деформаций композитной графит-эпоксидной (Gr/Ep) пластины с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии закрепленного на ее поверхности. **Метод.** Контроль деформаций композитной графит-эпоксидной пластины осуществлялся путем определения амплитуды внесенной дополнительной низкочастотной фазовой модуляции в импульсный интерферометр Фабри–Перо. Из-за зависимости амплитуды вносимой низкочастотной фазовой модуляции от величины рассогласования интерферометра изменение ее величины позволяет производить оценку деформаций исследуемого композитного материала. В качестве источника излучения был использован VCSEL с длиной волны 1550 нм. Фазовая модуляция создавалась посредством токовой модуляции лазерного источника, приводящей к изменению длины волны его излучения. **Основные результаты.** Получены зависимости амплитуды дополнительной низкочастотной фазовой модуляции от величины перестройки длины волны источника излучения и рассогласования интерферометра. Согласно результатам моделирования, при значениях коэффициента K_d 30, 100 и 250 пм чувствительность метода контроля деформаций композитного материала составила 1,6 мкрад×мкм/м, 5,3 мкрад×мкм/м и 13,3 мкрад×мкм/м соответственно. Были проведены экспериментальное исследование предложенного метода и анализ полученных результатов. Согласно экспериментальным результатам, погрешность представленного метода определения деформации составила порядка $1 \times 10^{-3}\%$, что соответствует относительному удлинению датчика на 10 мкм/м, в то время как существующие волоконно-оптические системы контроля деформаций на основе волоконных брэгговских решеток обеспечивают точность порядка 4 мкм/м. **Практическая значимость.** Предложенный метод может применяться для определения деформаций конструктивных элементов из композитного графит-эпоксидного материала наряду с его акустико-эмиссионным контролем одним волоконно-оптическим датчиком.

Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, импульсный интерферометр Фабри–Перо, графит-эпоксидный композитный материал, датчик деформаций, датчик акустической эмиссии, волоконная брэгговская решетка

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

DEFORMATION CONTROL METHOD OF COMPOSITE STRUCTURAL ELEMENTS BY FIBER-OPTIC ACOUSTIC EMISSION SENSOR

M.E. Efimov^a, A.V. Volkov^a, E.V. Litvinov^a

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: spbefimovmikhail@gmail.com

Article info

Received 01.02.18, accepted 27.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219

Article in Russian

For citation: Efimov M.E., Volkov A.V., Litvinov E.V. Deformation control method of composite structural elements by fiber-optic acoustic emission sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 212–219 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of a graphite-epoxy composite plate strain detection possibility by the fiber-optic acoustic emission sensor mounted on its surface. **Method.** The proposed method consisted in additional low-frequency phase-generated carrier implementation in the impulse Fabry-Perot interferometer and its amplitude evaluation. The phase-generated carrier amplitude depends on the interferometer optical path difference, therefore, its value change can be used for the studied composite strain estimation. VCSEL with a wavelength of 1550 nm was used as a light source. The phase carrier was generated by current modulation of the light source that caused center wavelength shift of the VCSEL. **Main Results.** The low-frequency phase-generated carrier signal amplitude dependence on the interferometer optical path difference and wavelength shift of the light source were obtained. According to simulation results the sensitivity of the proposed method is 1.6 urad×ppm, 5.3 urad×ppm and 13.3 urad×ppm at different values of the coefficient K_d 30, 100 and 250 pm, respectively. Experimental study of the proposed method and results analysis were performed. According to experimental results, the accuracy of the proposed method was about $1 \times 10^{-3}\%$ that corresponds to the sensor relative stretch of 10 $\mu\epsilon$, while the accuracy of the market available fiber optic systems based on fiber Bragg grating sensors equals to 4 ppm. **Practical Relevance.** The proposed method can be used for strain detection of the graphite-epoxy composite constructions along with its acoustic emission control by one fiber-optic sensor.

Keywords

fiber-optic sensor, impulse Fabry-Perot interferometer, graphite-epoxy (Gr/Ep) composite, strain sensor, acoustic emission sensor, fiber Bragg grating (FBG)

Acknowledgements

This work was performed in ITMO University and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. 03.G25.31.0245).

Введение

На сегодняшний день без применения акустико-эмиссионного контроля практически невозможны создание и надежная эксплуатация многих ответственных технических объектов в космо/авиастроении [1, 2], архитектуре [3, 4] и других областях [5, 6], использующих композитные материалы. Основными объектами неразрушающего контроля являются композитные материалы, так как из-за их нелинейной структуры не представляется возможным математически рассчитать и спрогнозировать возможные дефекты, которые могут появиться в процессе их эксплуатации. При нарушении физических свойств исследуемых материалов возникает акустико-эмиссионный сигнал, вызванный необратимой деформацией и разрушением внутренней структуры материала.

Из-за своих малых габаритов, волоконно-оптические датчики могут внедряться в конструкцию исследуемого композитного материала для мониторинга ее состояния и целостности, практически не оказывая влияния на характеристики жесткости и прочности материала [7–9].

Однако на практике, помимо мониторинга целостности композитных материалов, также необходимо определять степень деформации конструкции, например, для восстановления формы исследуемого объекта [10]. Для этого в состав систем неразрушающего контроля дополнительно включают волоконно-оптический датчик, чувствительным элементом которого зачастую является оптическое волокно с записанной в него волоконной брэгговской решеткой (ВБР) [11, 12]. При деформации композитного материала изменяется показатель преломления оптического волокна с записанной в него ВБР и ее период, тем самым изменяя резонансную длину волны. Таким образом, производя контроль длины волны ВБР, можно осуществлять контроль деформации конструкции из композитного материала.

В результате для осуществления одновременного контроля деформаций и целостности композитных материалов необходимо использовать дополнительный датчик, а также дополнительное оборудование для его опроса, что, в свою очередь, усложняет конструкцию и увеличивает себестоимость системы неразрушающего контроля. Однако предлагаемый метод позволяет определять деформацию композитного материала, используя только один волоконно-оптический датчик – датчик акустико-эмиссионного контроля. Создание такого датчика является актуальной задачей, так как позволяет снизить стоимость систем неразрушающего контроля, а также значительно упростить их конструкцию.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию метода определения деформации в композитных материалах с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии (ВОД АЭ).

Принцип работы метода определения деформации

На рис. 1 представлена принципиальная схема волоконно-оптического интерферометрического датчика акустической эмиссии на основе импульсного интерферометра Фабри–Перо, чувствительный элемент которого ограничен двумя полупрозрачными зеркалами (ППЗ) с коэффициентами отражения 4% [13]. Схема, представленная на рис. 1, работает следующим образом. Оптический импульс от ИИ проходит через оптический циркулятор и частично отражается от ППЗ₁. Часть света, прошедшая через первое зеркало, отражается от ППЗ₂ и при достаточной длительности оптического импульса и когерентности

источника излучения интерферирует с импульсом, отражающимся от первого зеркала, и приходит на ФП. Это происходит из-за того, что длительность светового импульса превышает время, которое необходимо пройти свету по датчику в обе стороны.

Далее полученный интерференционный сигнал преобразуется в цифровой сигнал и подается на вход схемы гомодинной демодуляции сигналов на основе вычисления значений функции арктангенса (PGC-Atan) [14, 15].

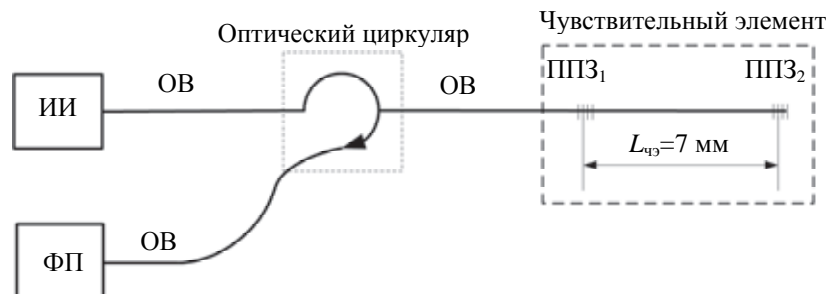


Рис. 1. Принципиальная схема волоконно-оптического датчика акустической эмиссии на основе импульсного интерферометра Фабри–Перо: ИИ – источник излучения, ОВ – оптическое волокно, ППЗ₁ – первое полупрозрачное зеркало (4%), ППЗ₂ – второе полупрозрачное зеркало (4%), ФП – фотоприемник

Интерференционный сигнал на входе рассматриваемой схемы демодуляции может быть представлен как

$$I(t) = A + B \cos[\varphi_c(t) + \varphi_d(t) + \varphi(t) + \varphi_0]; \quad (1)$$

$$\varphi_c(t) = C \cos(2\pi f_0 t); \quad (2)$$

$$\varphi_d(t) = D \cos(2\pi f t), \quad (3)$$

где A и B – постоянные, пропорциональные мощности оптического излучения, приходящего на фотоприемник; t – время; $\varphi_c(t)$ – сигнал высокочастотной фазовой модуляции (500 кГц); $\varphi_d(t)$ – сигнал дополнительной низкочастотной фазовой модуляции (5 кГц); $\varphi(t)$ – измеряемый сигнал акустической эмиссии (10–210 кГц); φ_0 – положение рабочей точки интерферометра; C – значение глубины высокочастотной фазовой модуляции; f_0 – частота сигнала высокочастотной фазовой модуляции; D – значение глубины низкочастотной фазовой модуляции; f – частота сигнала низкочастотной фазовой модуляции.

Для демодуляции сигнала (1) с помощью алгоритма PGC-Atan в интерференционный сигнал были введены высокочастотная вспомогательная фазовая модуляция (2) и низкочастотная фазовая модуляция (3), реализованные с помощью токовой модуляции VCSEL, приводящей к изменению центральной длины волны ИИ. Фаза интерференционного сигнала может быть выражена следующим образом:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta L_{\text{опт}}}{\lambda}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что при изменении длины волны источника излучения изменение фазы света в интерференционном сигнале может быть определено как

$$d\varphi = \frac{2\pi\Delta L_{\text{опт}} d\lambda}{\lambda^2}, \quad (5)$$

где $d\varphi$ – изменение фазы интерференционного сигнала; $\Delta L_{\text{опт}}$ – разность длин плеч чувствительного элемента (интерферометра Фабри–Перо); λ – длина волны оптического излучения; $d\lambda$ – изменение длины волны оптического излучения.

Согласно выражению (5), амплитуда сигнала высокочастотной фазовой модуляции пропорциональна величине перестройки центральной длины волны источника излучения в процессе модуляции. Таким образом, сигнал высокочастотной фазовой модуляции (2), который необходим для работы датчика акустической эмиссии, может быть приведен к следующему виду:

$$\varphi_c(t) = C \cos(2\pi f_0 t) = \frac{2\pi\Delta L_{\text{опт}}}{\lambda^2} K_c \cos(2\pi f_0 t), \quad (6)$$

$$\varphi_d(t) = D \cos(2\pi f t) = \frac{2\pi\Delta L_{\text{опт}}}{\lambda^2} K_d \cos(2\pi f t), \quad (7)$$

где K_c – коэффициент, отражающий диапазон перестройки длины волны излучения VCSEL для создания высокочастотной фазовой модуляции с амплитудой C , необходимой для демодуляции фазового сигнала. Оптимальная амплитуда фазовой модуляции для алгоритма PGC-Atan составляет 2,63 рад [14, 15]; K_d – коэффициент, отражающий диапазон перестройки длины волны излучения VCSEL для создания низкочастотной фазовой модуляции с амплитудой D .

Исходя из выражений (6) и (7), при изменении разбалансировки интерферометра ($\Delta L_{\text{опт}}$), т.е. изменении длины оптического волокна, пропорционально изменяются амплитуды фазовой модуляции C и D . Другими словами, при деформации композитного материала изменяется длина чувствительного элемента ($L_{\text{ч}}$ на рис. 1) которая в предложенном импульсном интерферометре Фабри–Перо равна величине разбалансировки ($\Delta L_{\text{опт}}$), что в соответствии с выражениями (6) и (7) приводит к изменению амплитуд фазовой модуляции. Однако для корректной демодуляции измеряемого сигнала акустической эмиссии с помощью алгоритма PGC-Atan глубина фазовой модуляции C должна соответствовать своему оптимальному значению 2,63 рад, что соответствует разности длины плеч интерферометра 20,3 мм и коэффициенту K_c , равному 100 пм. При увеличении или уменьшении разности хода интерференционных лучей (разбалансировки), глубина высокочастотной фазовой модуляции отклоняется от оптимального значения. Для стабилизации амплитуды выходного сигнала схемы демодуляции использовался алгоритм вычисления и автоподстройки глубины высокочастотной фазовой модуляции, представленный в работе [16].

С помощью алгоритма PGC-Atan производится демодуляция интерференционного сигнала (1) согласно схеме, представленной в работах [17, 18]. Демодулированный сигнал содержит три компоненты: $\varphi_d(t)$ – сигнал дополнительной низкочастотной фазовой модуляции; $\varphi(t)$ – измеряемый сигнал акустической эмиссии; φ_0 – положение рабочей точки интерферометра. Сигнал дополнительной модуляции $\varphi_d(t)$ имеет частоту 5 кГц и находится вне рабочей полосы датчика акустической эмиссии. Таким образом, можно выделить рассматриваемые сигналы с помощью полосовых фильтров (ПФ) и обработать их отдельно друг от друга.

Принцип метода определения деформации конструктивных элементов из композитного графит-эпоксидного материала с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии представлен на рис. 2.

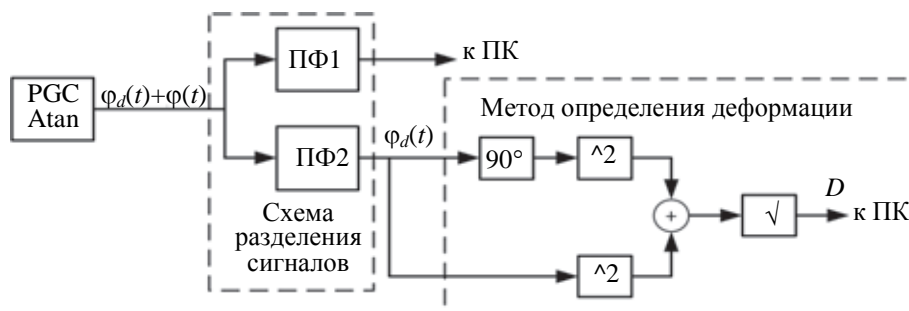


Рис. 2. Принцип метода определения деформации композитных конструктивных элементов с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии

Схема разделения фазовых сигналов состояла из двух полосовых фильтров: ПФ1 с полосой пропускания от 10 до 210 кГц и ПФ2 с полосой пропускания от 4,5 до 5,5 кГц. ПФ1 выделяет сигнал акустической эмиссии, который затем передается в персональный компьютер (ПК). ПФ2 выделяет сигнал низкочастотной фазовой модуляции, который подается на вход метода контроля деформаций композитного материала. Как следует из схемы на рис. 2, из фазового сигнала $\varphi_d(t)$ формируется пара квадратурных компонент с помощью преобразования Гильберта (блок 90°) [19], которые затем возводятся в квадрат и суммируются, тем самым выполняя основное тригонометрическое тождество.

Математическое моделирование предложенного метода контроля деформаций

Для проверки работоспособности метода контроля деформаций композитных конструктивных элементов было проведено его математическое моделирование в программной среде MATLAB. Полоса пропускания фильтра низких частот (ФНЧ) составила 200 кГц, частота дискретизации интерференционного сигнала была равна 5 МГц. Частота сигнала высокочастотной фазовой модуляции составляла 500 кГц, частота сигнала дополнительной низкочастотной фазовой модуляции была равна 5 кГц. Изменение оптического волокна составляло от -2 мкм до 2 мкм с шагом в 7 нм, за 0 было взято значение рассогласования длины плеч интерферометра в состоянии покоя – $20,3$ мм. Коэффициент K_d был равен 30 , 100 и 250 пм. Полоса пропускания первого полосового фильтра составила 200 кГц, а полоса пропускания второго полосового фильтра – 1 кГц. В ходе моделирования была получена зависимость изменения глубины низкочастотной фазовой модуляции от изменения длины оптического волокна в композитном материале при разных коэффициентах K_d .

На рис. 3 представлена зависимость изменения глубины низкочастотной фазовой модуляции от изменения длины оптического волокна в композитном материале при разных коэффициентах K_d .

Исходя из результатов моделирования, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что зависимость изменения глубины сигнала дополнительной фазовой модуляции от изменения длины оптического волокна в композитном материале является линейной, а угол наклона характеристики определяется

выбором коэффициента K_d . Согласно рис. 3, при значениях коэффициента K_d 30, 100 и 250 пм чувствительность метода контроля деформаций композитного материала составила 1,6 мкрад×мкм/м, 5,3 мкрад×мкм/м и 13,3 мкрад×мкм/м соответственно. Другими словами, при удлинении рассматриваемого чувствительного элемента на 7 нм (1 мкм/м) амплитуда низкочастотной фазовой несущей изменится на 1,6 мкрад, 5,3 мкрад и 13,3 мкрад. Следовательно, использование больших значений коэффициента K_d значительно увеличивает чувствительность к деформациям, так как малому значению изменения длины оптического волокна соответствует значительное изменение амплитуды дополнительной низкочастотной фазовой модуляции, тем самым обеспечивая наиболее эффективную работу предложенного метода.

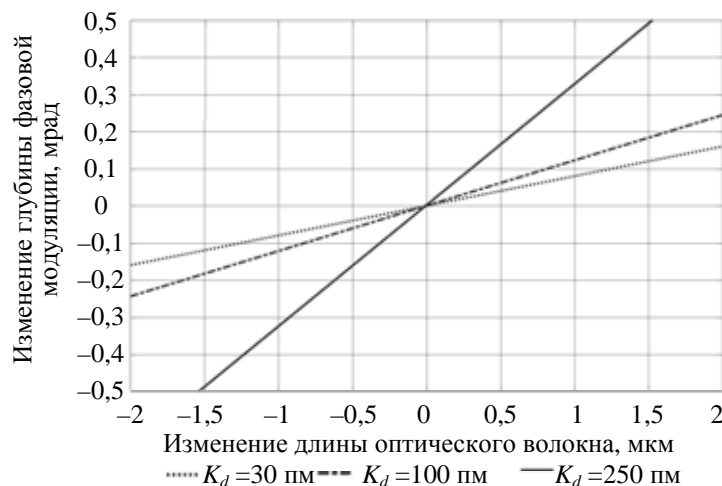


Рис. 3. Зависимость изменения амплитуды низкочастотной фазовой модуляции от изменения длины оптического волокна в композитном материале при разных коэффициентах K_d

Результаты экспериментального исследования

Для подтверждения результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование предложенного метода. Схема разделения фазовых сигналов и схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса были реализованы на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Волоконно-оптический интерферометрический датчик акустической эмиссии был закреплен на поверхности графит-эпоксидной композитной пластины (300×50×5 мм) с помощью эпоксидного клея. Такой метод крепления ВОД применен в работах [20, 21].

Для создания высокочастотной модуляции с глубиной модуляции 2,63 рад разность между плечами интерферометра была равна 20,3 мм, а коэффициент K_c – 100 пм. Основные параметры схемы PGC-Atan и метода определения деформации оптического волокна, такие как полосы пропускания фильтров и частота дискретизации, были выбраны согласно разработанной математической модели, описанной выше. Коэффициент K_d был равен 100 пм.

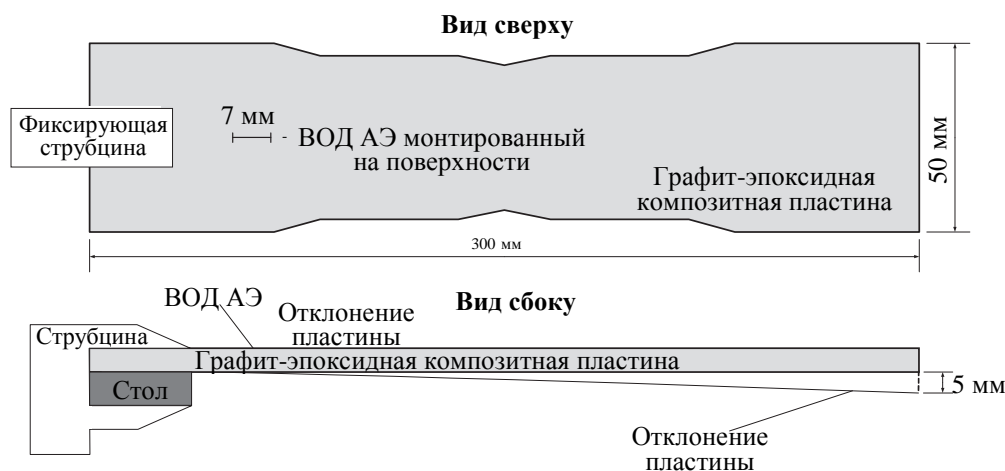


Рис. 4. Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд, представленный на рис. 4, работал следующим образом. Один край рассматриваемой пластины крепился к столу с помощью трубины. На второй край пластины оказывалось давление в 7 Па, которое изгибало ее на 5 мм от состояния покоя. Закрепленное на поверхности пла-

стины волокно регистрировало деформацию пластины. Получаемый интерференционный сигнал обрабатывался с помощью схемы PGC-Atan. Полученные фазовые сигналы поступали на схему разделения фазовых сигналов, после чего сигнал низкочастотной фазовой модуляции попадал на вход алгоритма определения деформации оптического волокна. Сигнал с выхода предложенного алгоритма пересчитывался в изменение длины оптического волокна. Полученный сигнал изменения длины чувствительного элемента импульсного интерферометра Фабри–Перо приведен на рис. 5.

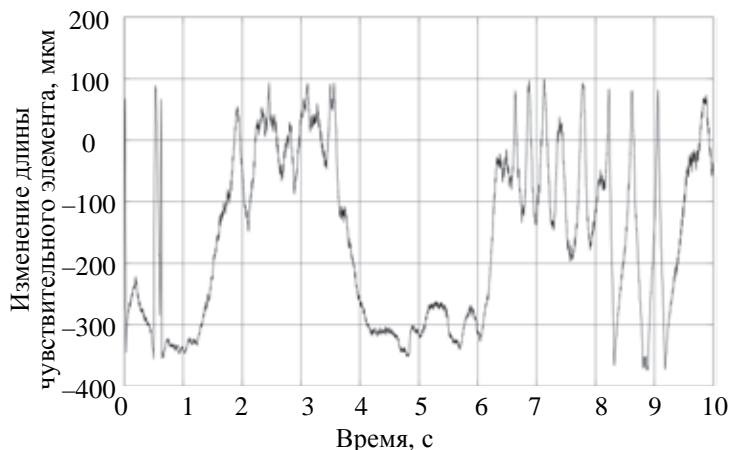


Рис. 5. Изменение длины чувствительного элемента, полученное с помощью предложенного алгоритма, при механическом воздействии на исследуемую графит-эпоксидную композитную пластину

Согласно полученным результатам, погрешность представленного метода определения деформации составила порядка $1 \times 10^{-3}\%$, что соответствует величине относительного удлинения на 10 мкм/м, в то время как волоконно-оптическая система контроля деформаций на основе ВБР обеспечивает точность порядка 4 мкм/м [22].

Заключение

В настоящей работе был предложен метод определения деформации композитного материала с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии, получена и проанализирована зависимость изменения глубины низкочастотной фазовой модуляции от изменения длины оптического волокна в композитном материале при разных коэффициентах K_d . Согласно результатам моделирования, при значениях коэффициента K_d 30, 100 и 250 пм, чувствительность метода контроля деформаций композитного материала составила 1,6 мкрад×мкм/м, 5,3 мкрад×мкм/м и 13,3 мкрад×мкм/м соответственно.

Работоспособность предложенного метода была подтверждена результатом экспериментального исследования, заключавшегося в определении изменения длины чувствительного элемента импульсного интерферометра Фабри–Перо при деформации графит-эпоксидной композитной пластины. Согласно экспериментальным результатам погрешность представленного метода определения деформации составила порядка $1 \times 10^{-3}\%$, что соответствует величине 10 мкм/м, в то время как точность определения деформации элементов конструкций с помощью датчиков на основе волоконных брэгговских решеток составляет порядка 4 мкм/м.

Литература

1. Di Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications // *Sensors*. 2015. V. 15. N 8. P. 18666–18713. doi: 10.3390/s150818666
2. Cairns D.S., Wood L.A. *Composite Materials for Aircraft Structures*. Montana State University, 2009. Режим доступа: <http://www.montana.edu/dcairns/documents/composites/MSUComposites2009.pdf> (дата обращения: 01.03.2018)
3. Kachlakev D. *Strengthening Bridges Using Composite Materials*. Report FHWA-OR-RD-98-08. Oregon: Oregon State University, 1998. 186 p.
4. Roberts J.E. *Composite Materials for Bridge Construction*. 2002. Режим доступа: <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/Composite-Materials-For-Bridge-Construction.pdf> (дата обращения: 01.03.2018).
5. Shenoj R.A., Dulieu-Barton J.M., Quinn S., Blake J.I. Boyd S.W. *Composite materials for marine applications: key*

References

1. Di Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 18666–18713. doi: 10.3390/s150818666
2. Cairns D.S., Wood L.A. *Composite Materials for Aircraft Structures*. Montana State University, 2009. Available at: <http://www.montana.edu/dcairns/documents/composites/MSUComposites2009.pdf> (accessed: 01.03.2018)
3. Kachlakev D. *Strengthening Bridges Using Composite Materials*. Report FHWA-OR-RD-98-08. Oregon, Oregon State University, 1998, 186 p.
4. Roberts J.E. *Composite Materials for Bridge Construction*, 2002. Available at: <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/Composite-Materials-For-Bridge-Construction.pdf> (accessed: 01.03.2018)
5. Shenoj R.A., Dulieu-Barton J.M., Quinn S., Blake J.I. Boyd S.W. *Composite materials for marine applications: key*

- challenges for the future // *Composite Materials*, 2011, P. 69–89. doi: 10.1007/978-0-85729-166-0_3
6. de Oliveira R., Ramos C.A., Marques A.T. Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors // *Computers and Structures*, 2008, V. 86, N 3-5, P. 340–346. doi: 10.1016/j.compstruc.2007.01.040
 7. Skontorp A. Structural integrity of quasi-isotropic composite laminates with embedded optical fibers // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, V. 19, N 13, P. 1056–1077. doi: 10.1106/T6CC-VA7D-FDK6-0BNG
 8. Zhou G., Sim L.M. Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review // *Smart Materials and Structures*, 2002, V. 11, N 6, P. 925–939. doi: 10.1088/0964-1726/11/6/314
 9. Schaaf K., Nemat-Nasser S. Optimization of sensor introduction into laminated composite materials // *Proceedings of SPIE*, 2008, V. 6932. doi: 10.1117/12.776315
 10. Derkevorkian A., Marsi S.F., Alvarenga J. et al. Strain-based deformation shape-estimation algorithm for control and monitoring applications // *AIAA Journal*, 2013, V. 51, N 9, P. 2231–2240. doi: 10.2514/1.J052215
 11. Kahandawa G.C., Epaarachchi J., Wang H., Lau K.T. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures // *Photonic Sensors*, 2012, V. 2, N 3, P. 203–214. doi: 10.1007/s13320-012-0065-4
 12. Ko W.L., Richards W.L., Tran V.T. Displacement Theories for In-Flight Deformed Shape Predictions of Aerospace Structures. *NASA TP-2007-214612*, 2007, 83 p.
 13. Куликов А.В., Мешковский И.К., Ефимов М.Е. Волоконно-оптическое интерферометрическое устройство для регистрации фазовых сигналов. Патент РФ, RU2624837. Оpubл. 07.07.2017.
 14. Беликин М.Н., Плотников М.Ю., Стригалева В.Е., Куликов А.В., Киреев А.Ю. Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2015, Т. 15, № 6, С. 1008–1014. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014
 15. Dandridge A., Tveten A.B., Giallorenzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, V. 30, N 10, P. 1635–1641. doi: 10.1109/TMTT.1982.1131302
 16. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhreggin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*, 2017, V. 17, N 13, P. 4143–4150. doi: 10.1109/JSEN.2017.2704287
 17. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors // *Proceedings of SPIE*, 2006, V. 6292, Art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
 18. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors // *Proceedings of SPIE*, 1994, V. 2191, P. 324–336. doi: 10.1117/12.173962
 19. Oppenheim A. V., Schaffer R.W., Buck J.R. *Discrete Time Signal Processing*, 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999, 870 p.
 20. Liang S., Zhang C., Lin W., Li L., Li C., Feng X., Lin B. Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission sensor for large structure health monitoring // *Optics Letters*, 2009, V. 34, N 12, P. 1858–1860. doi: 10.1364/OL.34.001858
 21. Chen Z., Ansari F. Fiber optic acoustic emission distributed crack sensor for large structures // *Journal of Structural Control*, 2000, V. 7, N 1, P. 119–129. doi: 10.1002/stc.4300070108
 22. Zhang X., Max J.J., Jiang X., Yu L., Kassi H. Experimental investigation on optical spectral deformation of embedded FBG sensors // *Proceedings of SPIE*, 2007, V. 6478. doi: 10.1117/12.700807
 6. de Oliveira R., Ramos C.A., Marques A.T. Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors. *Computers and Structures*, 2008, vol. 86, no. 3-5, pp. 340–346. doi: 10.1016/j.compstruc.2007.01.040
 7. Skontorp A. Structural integrity of quasi-isotropic composite laminates with embedded optical fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, vol. 19, no. 13, pp. 1056–1077. doi: 10.1106/T6CC-VA7D-FDK6-0BNG
 8. Zhou G., Sim L.M. Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review. *Smart Materials and Structures*, 2002, vol. 11, no. 6, pp. 925–939. doi: 10.1088/0964-1726/11/6/314
 9. Schaaf K., Nemat-Nasser S. Optimization of sensor introduction into laminated composite materials. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6932. doi: 10.1117/12.776315
 10. Derkevorkian A., Marsi S.F., Alvarenga J. et al. Strain-based deformation shape-estimation algorithm for control and monitoring applications. *AIAA Journal*, 2013, vol. 51, no. 9, pp. 2231–2240. doi: 10.2514/1.J052215
 11. Kahandawa G.C., Epaarachchi J., Wang H., Lau K.T. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures. *Photonic Sensors*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 203–214. doi: 10.1007/s13320-012-0065-4
 12. Ko W.L., Richards W.L., Tran V.T. Displacement Theories for In-Flight Deformed Shape Predictions of Aerospace Structures. *NASA TP-2007-214612*, 2007, 83 p.
 13. Kulikov A.V., Meshkovskij I.K., Efimov M.E. Fiber-Optic Interferometric Device for Detecting Phase Signals. *Patent RU2624837*, 2017.
 14. Belikin M.N., Plotnikov M.Yu., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Kireenkov A.Yu. Experimental comparison of homodyne demodulation algorithms for phase fiber-optic sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1008–1014. (in Russian) . doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014
 15. Dandridge A., Tveten A.B., Giallorenzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, vol. 30, no. 10, pp. 1635–1641. doi: 10.1109/TMTT.1982.1131302
 16. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhreggin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 4143–4150. doi: 10.1109/JSEN.2017.2704287
 17. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6292, art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
 18. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2191, pp. 324–336. doi: 10.1117/12.173962
 19. Oppenheim A. V., Schaffer R.W., Buck J.R. *Discrete Time Signal Processing*, 2nd ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1999, 870 p.
 20. Liang S., Zhang C., Lin W., Li L., Li C., Feng X., Lin B. Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission sensor for large structure health monitoring. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 12, pp. 1858–1860. doi: 10.1364/OL.34.001858
 21. Chen Z., Ansari F. Fiber optic acoustic emission distributed crack sensor for large structures. *Journal of Structural Control*, 2000, vol. 7, no. 1, pp. 119–129. doi: 10.1002/stc.4300070108
 22. Zhang X., Max J.J., Jiang X., Yu L., Kassi H. Experimental investigation on optical spectral deformation of embedded FBG sensors. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6478. doi: 10.1117/12.700807

Авторы

Ефимов Михаил Евгеньевич – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191417426, ORCID ID: 0000-0002-3736-0857, spbefimovmikhail@gmail.com

Волков Антон Валерьевич – студент, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194565170, ORCID ID: 0000-0002-7988-5854, avvolkov9223@gmail.com

Литвинов Елисей Викторович – студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3889-2628, elisey@niuitmo.ru

Authors

Mikhail E. Efimov – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191417426, ORCID ID: 0000-0002-3736-0857, spbefimovmikhail@gmail.com

Anton V. Volkov – student, research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194565170, ORCID ID: 0000-0002-7988-5854, avvolkov9223@gmail.com

Elisey V. Litvinov – student, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3889-2628, elisey@niuitmo.ru