

Д.С. Лобанов, Г.С. Шипунов, А.А. Воронков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕДРЕННЫХ В КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Представлены результаты экспериментальных исследований работоспособности внедренных в композиционный материал волоконно-оптических датчиков деформации на основе брэгговских решеток при испытаниях на растяжение в условиях нормальной и повышенных температур. Для оценки точности регистрируемых волоконно-оптическими датчиками данных использован навесной экстензометр продольных деформаций. Испытания проводились в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882, в состав которой входит термокамера с рабочим диапазоном температур от -100 до $+350$ °С. Для сбора информации о состоянии волоконно-оптических датчиков во время проведения испытаний использовался интеррогатор ASTRO X327 с частотой опроса 100 Гц.

Исследовались образцы композиционного материала, изготовленного на основе препрега стеклопластика ВПС-48 с внедренной линией волоконно-оптических датчиков на основе решеток Брэгга методом прямого прессования. Предварительные испытания проводились до разрушения на образцах без внедренных волоконно-оптических датчиков с целью построения полной диаграммы деформирования для дальнейшего определения уровней нагружения. Испытания на растяжение на образцах с внедренными оптоволоконными датчиками проводились при температурах 22, 60, 110 и 135 °С. По результатам испытаний построены диаграммы деформирования. Проанализированы зависимости регистрируемых значений деформации двумя независимыми методами измерений: волоконно-оптическими датчиками и навесным экстензометром при повышении температуры.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики деформации на брэгговских решетках, полимерный композиционный материал, экспериментальная механика, напряженно-деформированное состояние, повышенные температуры, испытания на растяжение.

D.S. Lobanov, G.S. Shipunov, A.A. Voronkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**EVALUATION OF THE OPERABILITY AND EXPEDIENCY
OF USING FIBER-OPTICAL SENSORS EMBEDDED
IN A COMPOSITE MATERIAL AT ELEVATED TEMPERATURES**

The paper presents the results of experimental studies of the operability of fiber-optical deformation sensors embedded in a composite material on the basis of Bragg gratings under tensile tests under normal and elevated temperatures. To assess the accuracy of the data recorded by fiber-optic sensors, a hinged extensometer of longitudinal deformations was used. The tests were carried out at the Center for Experimental Mechanics of PNRPU on the universal electromechanical test system Instron 5882, which includes an oven with a working temperature range from -100 to $+350$ °C. To collect information about the state of optical fiber sensors during the tests, an ASTRO X327 interrogator with a sampling frequency of 100 Hz was used.

The samples of a composite material made on the basis of a prepreg of fiberglass VPS-48 with an embedded line of fiber-optic sensors based on Bragg gratings by direct compression were investigated. Preliminary tests were performed up to failure on samples without embedded fiber-optic sensors in order to build a complete deformation diagram for further determination of loading levels. Tensile tests on samples with embedded fiber-optic sensors were carried out at temperatures of 22, 60, 110 and 135 °C. Based on the test results, deformation diagrams are constructed. The dependencies of the recorded strain values by two independent measurement methods by fiber-optic sensors and a hinged extensometer with increasing temperature were analyzed.

Keywords: fiber-optical strain gauges on Bragg gratings, polymeric composite material, experimental mechanics, stress-strain state, elevated temperatures, tensile tests.

Введение

В настоящее время всё чаще применяются полимерные композиционные материалы в конструкциях элементов авиационных двигателей, работающих в условиях сложного механического и температурного воздействия. К сожалению, опыт и объем исследований по применению композитов в деталях и узлах, подверженных длительным интенсивным температурным и силовым воздействиям, значительно меньше, чем для большинства сталей и сплавов. В связи с чем становятся актуальными проблемы мониторинга состояния конструкций из полимерных композиционных материалов ПКМ [1–3].

Для мониторинга конструкций из композиционных материалов и исследования эксплуатационных и технологических дефектов, трещин, отслоений наиболее часто применяются на практике такие методы диагностики, как ультразвуковая дефектоскопия [4, 5], рентген, термография, акустическая эмиссия [2, 3, 6–10] и волоконные оптические датчики [6, 11]. Все эти распространенные методы позволили внести значительный вклад в понимание процесса разрушения композиционных материалов. Тем не менее приведенные методы обладают рядом особенностей: необходимость в полировке поверхности образца, особые требования по размерам, технологические сложности при приклеивании датчиков, что затрудняет их применение в ПКМ. Основной особенностью ПКМ является то, что материал не существует отдельно от конструкции. Это обстоятельство приводит к тому, что физико-механические свойства, реализуемые при испытании стандартных образцов, значительно отличаются от свойств, реализуемых в конструкции. Однако в самом принципе создания композиционного материала и конструкции одновременно из ряда отдельных компонентов (волокон, ткани, матрицы и т.п.), фактически создания материала-детали, можно найти решение проблемы обеспечения его надежности. Это – создание материала с возможностью диагностики и мониторингом своего состояния в процессе стендовых, летных испытаний и, в перспективе, при длительном процессе эксплуатации с помощью волоконно-оптических датчиков (ВОД) [12–20].

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой периодическое изменение коэффициента преломления в сердцевине оптического волокна. При прохождении широкополосного оптического спектра через оптическое волокно часть его отражается от ВБР. При приложении механического или температурного воздействия на ВБР отраженный спектр смещается, что позволяет оценивать величину деформации или изменение температуры [2, 3]. Для внедрения ВОД в конструкции, изготавливаемые по методу горячего отверждения с применением избыточного давления, используются оптические волокна с полиамидным покрытием. Поперечное давление, оказываемое на решетку в процессе формования композиционного материала, искажает спектр отраженного сигнала ВОД, что приводит к возникновению дополнительного пика мощности. В связи с этим актуальными становятся задачи исследования влияния повышенных и пониженных температур на механическое поведение и свойства полимерных композитов [21, 22], а также смарт-материалов на основе ПКМ и внедренных ВОД.

Таким образом, целью работы является экспериментальная оценка работоспособности внедренных в композиционный материал волоконно-оптических датчиков деформаций при повышенных температурах, приближенных к эксплуатационным.

Материалы, испытательное оборудование и методики испытаний

Объектом исследования являлись образцы композиционного материала, изготовленного на основе препрега стеклопластика ВПС-48 методом прямого прессования с внедренными ВОД на основе брэгговских решеток в НОЦ АКТ ПНИПУ.

Испытания проводились в ЦКП ЦЭМ ПНИПУ на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882, в состав которой входит термокамера с рабочим диапазоном температур от –100 до +350 °С. В качестве независимого метода измерения деформации

применялся осевой динамический экстензометр Instron 2620-601 с измерительной базой 50 мм и максимально возможным отклонением от измеряемой величины 0,15 %.

Регистрация данных с внедренных ВОД в течение всего процесса нагружения осуществлялась с использованием интеррогатора ASTRO X327 с частотой опроса 100 Гц.

Схема расположения волоконно-оптических датчиков на образце и образец стеклопластика с навесным экстензометром, установленный в захватах испытательной системы, представлены на рис. 1.

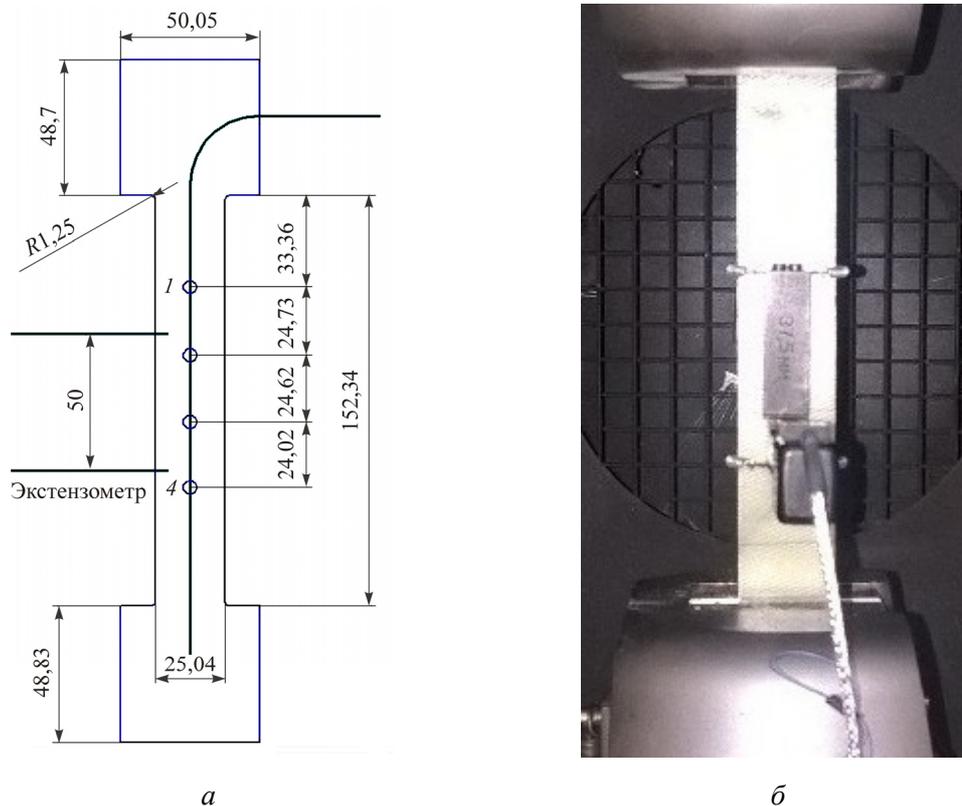


Рис. 1. Схема расположения волоконно-оптических датчиков на образце (а) и образец стеклопластика с навесным экстензометром, установленный в захватах испытательной системы (б)

Структурная схема измерения одноосной деформации в плоском образце из ПКМ с использованием внедренных ВОД на основе брэгговской решетки представлена на рис. 2. Согласно этой схеме интеррогатор генерирует и передает по оптическому волокну широкополосный оптический сигнал $\psi(\lambda)$ (λ – длина волны). На брэгговской решетке часть этого сигнала отражается. Основная часть отраженного оптического сигнала имеет длину волны λ – резонансная длина волны отраженного спектра. Величина этой волны прямо пропорциональна эффективному показателю преломления n и геометрической длине периода брэгговской решетки L (см. рис. 2). Именно эта зависимость и определила возможность регистрации изменения относительной длины периода $\Delta L/L$ по анализу изменения относительной величины резонансной длины волны отраженного спектра $\Delta\lambda/\lambda$.

Согласно работе [13], имеется зависимость

$$\Delta\lambda/\lambda = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T, \quad (1)$$

где ϵ – относительная деформация брэгговской решетки вдоль ее оси за счет механического деформирования; ΔT – изменение температуры оптического волокна в месте расположения брэгговской решетки с момента начала измерений резонансной длины волн отраженного спектра;

K_ϵ , K_T – соответственно деформационный и температурный коэффициенты; $\Delta\lambda$ – разница величин резонансных длин волн отраженного спектра соответственно в текущий (λ) и начальный (λ^*) моменты времени, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda^*$.

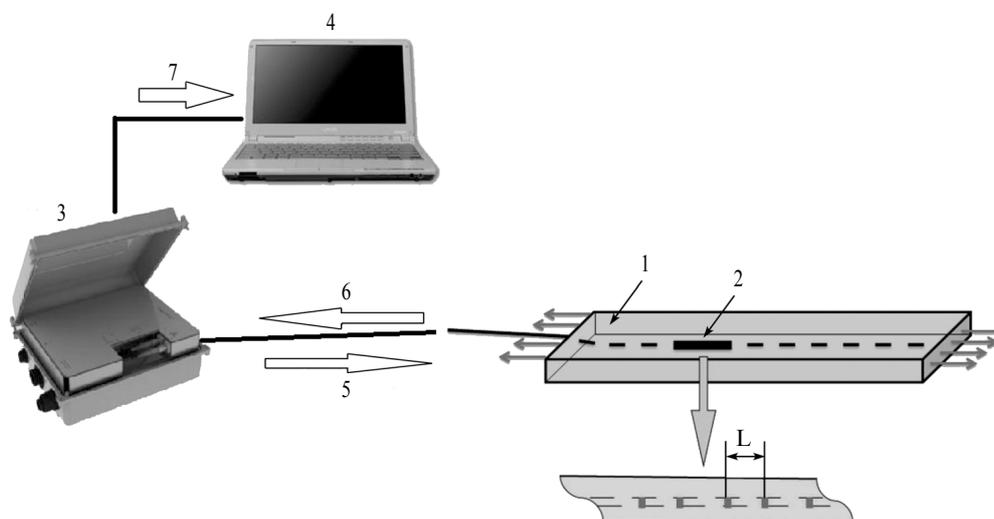


Рис. 2. Схема работы волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток: 1 – образец; 2 – участок оптического волокна с ВОД; 3 – интеррогатор; 4 – компьютер; 5 – широкополосный спектр; 6 – отраженный спектр; 7 – вывод на компьютер

Для рассматриваемого случая рабочий диапазон измеряемых значений продольных деформаций с четырьмя ВОД на одной линии составляет от 0,01 до 0,7 %. В связи с этим программа исследований включала в себя два этапа. На первом этапе проводились предварительные испытания образцов стеклопластика без внедренных ВОД до разрушения и построения полных диаграмм деформирования при температурах 22, 60, 110 и 135 °С. Испытания проводились с учетом рекомендаций стандартных методик (ГОСТ 25.601–80, ASTM D 3039) в части выбора формы и геометрии образцов, термостатирования при повышенных температурах, скорости нагружения и статистической обработки. Образцы в виде полосок, без накладок, размерами 250×25×4,5 мм. Скорость перемещения траверсы 2 мм/мин. При каждой температуре испытывались по три образца до разрушения с определением предельных и упругих характеристик.

На втором этапе испытывался образец (см. рис. 1) с внедренной линией ВОД в упругой зоне при температурах 22, 60, 110 и 135 °С. Для обеспечения однородного температурного поля при достижении заданной температуры в термокамере производилось термостатирование в течении 2 ч. После проведения выдержки на каждой температуре производилась настройка интеррогатора на резонансные (брегговские) длины волн при ненагруженном образце. Выходной информацией интеррогатора ASTRO X327 является отклонение резонансной длины волны относительно начальной (базовая) [13]. При каждой температуре производилось по пять нагружений со скоростью 2 мм/мин до значения нагрузки 16 кН. В начале каждого испытания производилось преднагружение до 0,5 кН со скоростью 20 мм/мин и последующей полной разгрузкой. Данная операция проводилась для синхронизации данных, регистрируемых испытательной системой и интеррогатором при нагружении образцов, с целью их последующей обработки и сопоставления.

Результаты испытаний

Результаты предварительных испытаний на одноосное растяжение при нормальной и повышенных температурах образцов стеклопластика представлены в виде средних значений основных механических свойств (табл. 1). Диаграммы деформирования приведены на рис. 3.

Результаты предварительных испытаний на растяжение образцов стеклопластика при нормальной и повышенных температурах

№ п/п	Температура, °С	Макс. нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
1	22	39,2 ± 3,2	329 ± 28	26,5 ± 1,5	0,14 ± 0,1
2	60	35,3 ± 1,8	307 ± 18	23,2 ± 1,5	0,14 ± 0,2
3	110	34,0 ± 3,1	295 ± 24	22,8 ± 1,6	0,11 ± 0,2
4	135	28,9 ± 5,4	251 ± 50	20,4 ± 0,9	0,11 ± 0,1

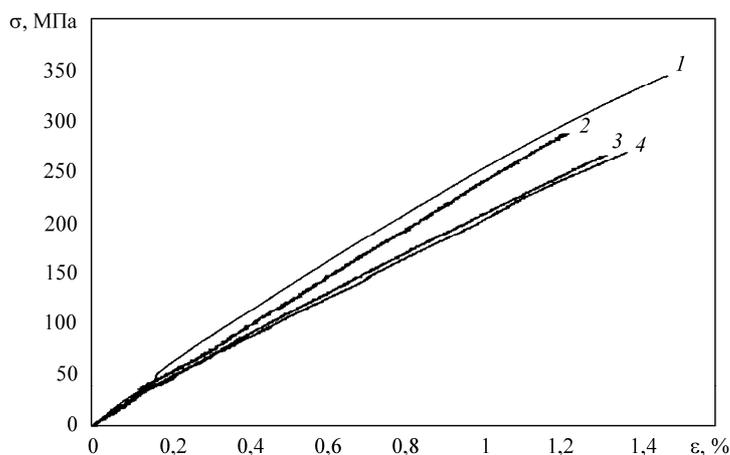


Рис. 3. Типовые диаграммы деформирования образцов стеклопластика при нормальных и повышенных температурах: 1 – 22 °С; 2 – 60 °С; 3 – 110 °С; 4 – 135 °С

Проанализировав табличные данные и полученные диаграммы деформирования, установили, что при повышении температуры с 22 до 135 °С происходит ожидаемое снижение механических свойств стеклопластика до 25 % [21]. По результатам предварительных испытаний подтверждено, что нагружение до значений 16 кН (142 МПа) гарантированно обеспечивает деформации образца в упругой зоне и в диапазоне измерений ВОД при всех исследуемых значениях температур.

Результаты испытаний образца стеклопластика с внедренными ВОД при нормальной и соответствующих повышенных температурах представлены на рис. 4. На рисунке приведены диаграммы деформирования, построенные по данным с навесного экстензометра (сплошные линии) и ВОД (пунктирные линии) при температурах 22, 60, 110 и 135 °С.

Температурные зависимости упругих характеристик стеклопластика, полученные двумя независимыми методами регистрации, представлены в табл. 2 и на рис. 5. Для модуля упругости разница в значениях, полученных навесным экстензометром и ВОД при нормальной и повышенных (60, 110 и 135 °С) температурах, не превышает 7 %. При этом общее снижение значений модуля упругости от повышения температуры составило 8 и 11 %, полученных по данным экстензометра и ВОД соответственно.

Для зафиксированных значений деформаций при максимальной нагрузке в экспериментах 16 кН, полученных навесным экстензометром и ВОД при нормальной и повышенных температурах, не превышает 9 %, а общее увеличение значений деформаций от повышения температуры составило 10 и 13 % по данным экстензометра и ВОД соответственно.

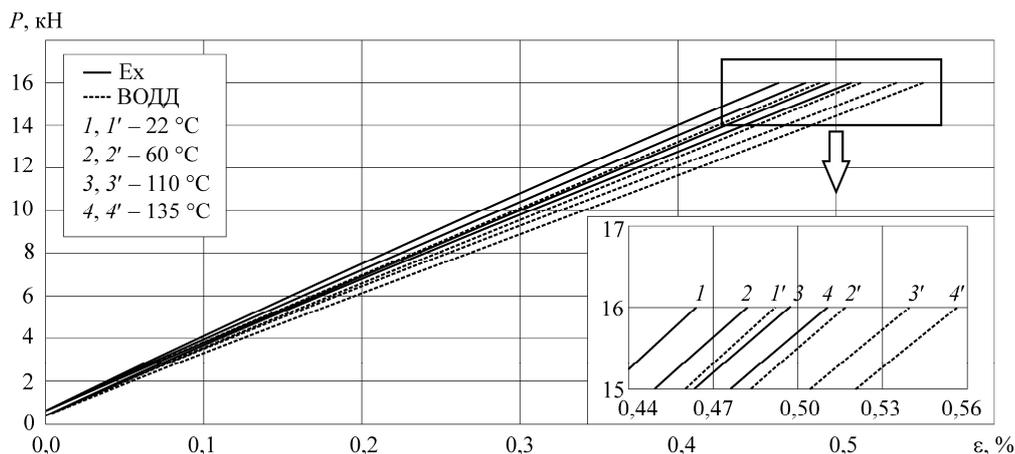


Рис. 4. Диаграммы нагружения образца с внедренными ВОД при нормальной и повышенных температурах: данные с навесного экстензометра показаны сплошной линией; данные с ВОД показаны пунктирной линией

Таблица 2

Средние значения по пяти нагружениям модуля упругости и деформации при 16 кН навесным экстензометром и ВОД при нормальной и повышенных температурах

№ п/п	Температура, °С	Модуль упругости, ГПа		Деформации при 16 кН, %	
		Навесной экстензометр	ВОД	Навесной экстензометр	ВОД
1	22	27,3 ± 0,1	26,1 ± 0,1	0,46	0,49
2	60	26,6 ± 0,1	25,1 ± 0,1	0,48	0,52
3	110	25,7 ± 0,1	24,1 ± 0,1	0,50	0,53
4	135	24,9 ± 0,1	23,4 ± 0,1	0,51	0,56

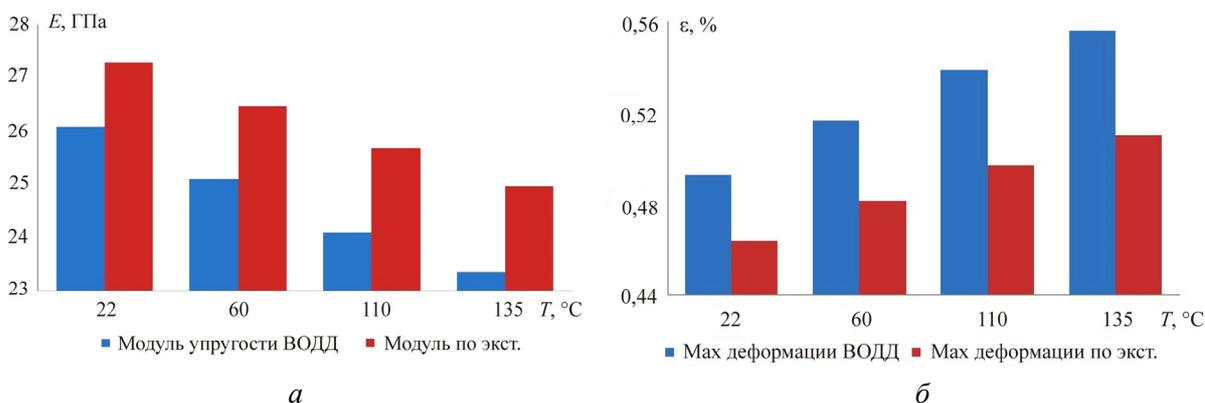


Рис. 5. Зависимости изменения средних значений модуля упругости (а) и деформации (б) при нагрузке 16 кН

Необходимо отметить, что при внедрении ВОД в композиционный материал на основе стеклопластика возникает смещение резонансной длины волны и появление «фантомных» сигналов с брэгговских решеток, при этом разница в показаниях между ВОД и экстензометром составляет порядка 7%. При нагреве свыше 110 °С резонансная длина волны возвращается к исходной (до внедрения), происходит исчезновение «фантомных» сигналов внедренных датчиков, а разница показаний между ВОД и экстензометром не изменяется и остается на уровне 5–8%. Замеченная особенность поведения внедренных ВОД позволяет косвенно предполо-

жить, что технологический режим производства, в том числе и внедрения ВОД в композит, не оказывает существенного влияния на работоспособность данного метода мониторинга.

Заключение

Таким образом, в ходе работы проведены экспериментальные исследования по оценке работоспособности перспективного и активно развивающегося метода мониторинга ответственных конструкций из композиционных материалов, основанного на внедрении в материал волоконно-оптических датчиков деформаций на брэгговских решетках. Проведены испытания авиационного композиционного материала на основе препрега стеклопластика с внедренной линией волоконно-оптических датчиков деформаций на растяжение при нормальной и повышенных эксплуатационных температурах. Для независимой проверки регистрируемых ВОД значений деформаций был использован навесной экстензометр. Проведено сравнение полученных результатов на всем температурном диапазоне и установлено, что разброс регистрируемых значений деформаций двумя независимыми методами измерений не превышает 9 %, что указывает на снижение чувствительности ВОД при внедрении в структуру ПКМ.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00243)

Библиографический список

1. К вопросу об интеграции оптоволокна в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных Брэгговских решеток / М.А. Зуев, В.В. Махсидов, М.Ю. Федотов, А.М. Шиенок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 568–574.
2. Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis / Y. Mizutani, K. Nagashima, M. Takemoto, K. Ono // NDT&E Int. – 2000. – Vol. 33(2). – P. 101–110.
3. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки / Ун-т ИТМО. – СПб., 2015. – 65 с.
4. Bouazzaoui R.E., Baste S., Camus G. Development of damage in a 2D woven C/SiC composite under mechanical loading: II. Ultrasonic characterization // Compos Sci Technol. – 1996. – Vol. 56, № 12. – P. 1373–1382.
5. Ultrasonic NDE techniques for the evaluation of matrix cracking in composite laminates / K. Steiner, R. Eduljee, X. Huang, J.G. Jr // Compos Sci Technol. – 1995. – Vol. 53. – P 193–198.
6. Zhou G., Sim L. Evaluating damage in smart composite laminates using embedded EFPI strain sensors // Opt Lasers Eng. – 2009. – Vol. 47. – P. 1063–1068.
7. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии / Д.С. Лобанов, В.Э. Вильдеман, Е.М. Спаскова, А.И. Чихачев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 159–170.
8. Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии / А.И. Шилова, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, Ю.Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 4. – С. 169–179.
9. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission / P.F. Liu, J.K. Chu, Y.L. Liu, J.Y. Zheng // Materials and Design. – 2012. – Vol. 37. – P. 228–235.
10. Identification of failure mechanisms of metallised glass fibre reinforced composites under tensile loading using acoustic emission analysis / E. Njuhovic, M. Brau, I Wolff-Fabris, K. Starzynski, V. Altstadt // Composites Part B. – 2015. – № 81. – P. 1–13.
11. A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors / S. Yashiro, N. Takeda, T. Okabe, H. Sekine // Composites Science and Technology. – 2005. – Vol. 65. – P. 659–667.
12. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites / Li Li, S.V. Lomov, Xiong Yan, V. Carvelli // Composite Structures. – 2014. – № 116. – P. 286–299.

13. Измерение неоднородных полей деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками / А.Н. Аношкин, А.А. Воронков, Н.А. Кошелева, В.П. Матвеев, Г.С. Сероваев, Е.М. Спаскова, И.Н. Шардаков, Г.С. Шипунов // *Механика твердого тела*. – 2016. – № 5. – С. 42–51.
14. *Concise Encyclopedia of Composite Materials (Advances in Materials Sciences and Engineering)* / ed. A. Kelly. – England: Revised Edition, 1994. – 350 p.
15. Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, National Materials Advisory Board, Aeronautics and Space Engineering Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council. *New Materials for Next-Generation Commercial Transports*. – Washington: National academy press, 1996. – 98 p.
16. Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity-based optical fiber sensors / D. Lee, J. Lee, I. Kwon, D. Seo // *Smart Mater. Struct.* – 2001. – Vol. 10. – P. 285–292.
17. Delamination detection in laminate composites with an embedded fiber optical interferometric sensor / C.K. Leung, Z. Yang, Y. Xu, P. Tong, S.K. Lee // *Sensors and Actuators A: Phys.* – 2005. – Vol. 119, № 2. – P. 336–344.
18. The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths / D. Kanga, S. Parkb, C. Hongb, C. Kimb // *NDT&E International*. – 2005. – Vol. 38, № 8. – P. 712–718.
19. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study / G. Luyckx, E. Voet, W. De Waele, J. Degrieck // *Smart Mater. Struct.* – 2010. – Vol. 19. – Art. ID 105017.
20. Mawatari T., Nelson D. A multi-parameter Bragg grating fiber optic sensor and triaxial strain measurement // *Smart Mater. Struct.* – 2008. – Vol. 17. – Art. ID 035033.
21. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Экспериментальные исследования влияния повышенных и высоких температур на прочностные и деформационные свойства комбинированных стеклоорганопластиков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2017. – № 1. – P. 104–117. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.07
22. Болотин В.В., Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н. Влияние повышенных температур на удельную работу межслойного разрушения композитных материалов с полимерной матрицей // *Механика композитных материалов*. – 1990. – № 6. – С. 1033–1037.

References

1. Mahsidov V.V., Fedotov M.YU., Shienok A.M., Zuev M.A. K voprosu ob integracii optovolokna v PKM I izmerenii deformacii materiala s pomoshch'yu volokonnyh breggovskih reshetok [To the question of fiber integration in in composites and measurement of material deformation using fiber Bragg gratings]. *Mekhanika kompozicionnyh materialov I konstrukcij*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 568-574.
2. Mizutani Y., Nagashima K., Takemoto M., Ono K. Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis. *NDT&E Int.*, 2000, vol. 33(2), pp. 101-110.
3. Varzhel S.V., Volokonnye breggovskie reshetki. SPb: Universitet ITMO, 2015, no. 65, 3 p.
4. Bouazzaoui R.E., Baste S., Camus G. Development of damage in a 2D woven C/SiC composite under mechanical loading: II. Ultrasonic characterization. *Compos. Sci. Technol.*, 1996, vol. 56, no. 12, pp. 1373-1382.
5. Steiner K., Eduljee R., Huang X., Jr J.G. Ultrasonic NDE techniques for the evaluation of matrix cracking in composite laminates. *Compos Sci Technol* 1995, vol. 53, pp. 193-198.
6. Zhou G., Sim L. Evaluating damage in smart composite laminates using embedded EFPI strain sensors. *Opt. Lasers Eng.*, 2009, vol. 47, pp. 1063-1068.
7. Lobanov D.S., Vildeman V.EH., Spaskova E.M., Chihachev A.I. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya defektov na prochnost kompozitnyh panelej metodami korrelyacii cifrovyyh izobrazhenij I infrakrasnoj termografii [Experimental study of the defects effect on the strength of composite panels by methods of correlation of digital images and infrared thermography]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 159-170.
8. Shilova A. I., Vildeman V. EH., Lobanov D. S., Lyamin YU. B. Issledovanie mekhanizmov razrusheniya uglerodnyh kompozicionnyh materialov na osnove mekhanicheskikh ispytanij s registraciej signalov akusticheskoy ehmissii [Investigation of destruction mechanisms of carbon composite materials on the basis of mechanical tests with registration of acoustic emission signals]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 169-179.

9. Liu P.F., Chu J.K., Liu Y.L., Zheng J.Y. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission. *Materials and Design*, 2012, vol. 37, pp. 228-235.
10. Njuhovic E., Brau M., Wolff-Fabris I, Starzynski K., Altstadt V. Identification of failure mechanisms of metallised glass fibre reinforced composites under tensile loading using acoustic emission analysis. *Composites Part B*, 2015, vol. 81, pp. 1-13.
11. Yashiro S., Takeda N., Okabe T., Sekine H. A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, pp. 659-667.
12. Li Li, S.V. Lomov, Xiong Yan, V. Carvelli. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 2014, vol. 116, pp. 286–299.
13. Anoshkin A.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S., Spaskova E.M., Shardakov I.N., Shipunov G.S. Izmerenie neodnorodnyh polej deformacij vstroennymi v polimernyj kompozitsionnyj material volokonno-opticheskimi datchikami [Measurement of inhomogeneous strain fields in a polymer composite by embedded fiber-optic sensors]. *Mehanika tverdogo tela*, 2016, no. 5, pp. 42-51.
14. Concise Encyclopedia of Composite Materials (Advances in Materials Sciences and Engineering). Ed. A. Kelly. England: Revised Edition, 1994, 350 p.
15. Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, National Materials Advisory Board, Aeronautics and Space Engineering Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council. *New Materials for Next-Generation Commercial Transports*. Washington, D.C: National academy press, 1996, 98 p.
16. Lee D., Lee J., Kwon I., Seo D. Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity-based optical fiber sensors. *Smart Mater. Struct.*, 2001, vol. 10, pp. 285-292.
17. Leung C.K., Yang Z., Xu Y., Tong P., Lee S.K. Delamination detection in laminate composites with an embedded fiber optical interferometric sensor. *Sensors and Actuators A: Phys.*, 2005, vol. 19, pp. 336-344.
18. Kanga D., Parkb S., Hongb C., Kimb C. The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths. *NDT&E International*. 2005, vol. 38, no. 8, pp. 712-718.
19. Luyckx G., Voet E., De Waele W., Degrieck J. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study. *Smart Mater. Struct.*, 2010, vol. 19, Art. ID 105017.
20. Mawatari T., Nelson D. A multi-parameter Bragg grating fiber optic sensor and triaxial strain measurement [Influence of elevated temperatures on the specific work of interlayer destruction of composite materials with a polymer matrix]. *Mehanika kompozitnyh materialov*, 2008, vol. 17, Art. ID 035033.
21. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Experimental studies of the high temperature influence on strength and deformation properties of combined glass organoplastics. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 104-117. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.07
22. Bolotin V.V., Murzahanov G.H., Shchugorev V.N. Vliyanie povyshennyh temperatur na udel'nyy rabotu mezhslojnogo razrusheniya kompozitnyh materialov s polimernoj matricej. *Mekhanika kompozitnyh materialov*, 1990, no. 6, pp. 1033-1037.

Об авторах

Лобанов Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: sem.lobanov@gmail.com).

Шипунов Глеб Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук научный сотрудник Научно-образовательного центра акустических исследований, разработки и производства композитных и звукопоглощающих авиационных конструкций ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: shipunov-kt@pstu.ru).

Воронков Андрей Александрович (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Научно-образовательного центра акустических исследований, разработки и производства композитных и звукопоглощающих авиационных конструкций ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: aavoronkov714@gmail.com).

About the authors

Dmitry S. Lobanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Researcher, Center for Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem.lobanov@gmail.com).

Gleb S. Shipunov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Researcher, Scientific, Educational Center for Aviation Composite Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: shipunov-kt@pstu.ru).

Andrey A. Voronkov (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Scientific & Educational Center for Aviation Composite Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aavoronkov714@gmail.com).

Получено 12.07.2017