

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРИРОВАННЫХ В ЕГО СТРУКТУРУ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК¹

Махсидов В.В., Яковлев Н.О., Ильичев А.В., Шиенок А.М.

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных
материалов», г. Москва, Россия*

РЕЗЮМЕ

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) являются перспективной основой датчиков определения деформации и начинают все шире применяться в измерительных системах для различных конструкций. Более того, исследуется возможность применения таких ВБР в системе встроенного контроля элементов конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в ряде отраслей промышленности, в частности для элементов конструкций авиационного назначения. В данной работе опробован способ измерения деформации образцов углепластика с помощью интегрированной ВБР, в основе которого лежит метод калибровки. Показано, что измерение деформации предложенным способом дает сравнимые результаты с измерениями с помощью экстензометра и тензодатчика. Рассмотренная методика измерения может применяться при изучении фактического распределения осевой составляющей деформации в структуре ПКМ для образцов, которые работают, главным образом, на растяжение-сжатие. Данную методику возможно применять и для элементов конструкций из ПКМ, которые допускают предварительное нагружение в рабочем диапазоне нагрузок перед началом эксплуатации.

Ключевые слова: оптоволоконный чувствительный элемент; волоконная брэгговская решетка; деформация; полимерный композиционный материал; углепластик; встроенный контроль

STRAIN MEASUREMENT OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC WITH EMBEDDED FIBRE BRAGG GRATING

Makhsidov V.V., Yakovlev N.O., Ilichev A.V., Shiyonok A.M.

*FSUE «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials»
17, Radio st., Moscow, 105005, Russia, e-mail: admin@viam.ru*

SUMMARY

Due to advantages fibre optic sensors base on bragg grating (FBG) begin wider and wider apply for measurement systems in some industry. Furthermore, possibilities of using FBG for remote structural health monitoring especially for aviation structural elements are estimated. In this paper method of measurement axial deformation of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) specimen with embedded FBG during tension was studied. This method allow measuring elongation of specimens with the same precision as strain gage or extensometer. The method

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-03-12047 офи_м).

can apply for study of distribution of axial deformation in the CFRP specimen structure undergo to tension or compression. It is possible to use this method to measuring of axial deformation of structural elements based on CFRP which are capable to preliminary loading in operating range before operation.

Key words: fiber optic sensor; fibre bragg grating; deformation; polymer matrix composite; structural health monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Длительная эксплуатация изделий авиационной техники требует периодической диагностики конструкции и оценку ее остаточного ресурса. На сегодняшний день выполнение данных процедур предписывает приостановку эксплуатации авиатехники и выполнение процедур осмотра, в т. ч. с применением дополнительного оборудования. В ряде случаев необходима внеплановая проверка конструкции. Данные действия приводят к простоя авиатехники и, как следствие, вынужденным дополнительным расходам. Как минимум значительно сократить время осмотра изделия, а в перспективе при определенных случаях исключить их, возможно с помощью системы встроенного контроля, которая позволит не только своевременно выявлять проблемные места конструкции и сокращать время их поиска, но и в перспективе прогнозировать ее остаточный ресурс в реальном масштабе времени. Это особенно важно для изделий на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ), т. к. объем их применения в силовых элементах конструкций авиационной и космической техники [1-6], а также в конструкциях сложных технических систем [7-9], увеличивается.

В наши дни в качестве чувствительных элементов в системах встроенного контроля в основном используются пьезоэлектрические, акустические, тепловые, электромагнитные и, особенно широко, электрические датчики (тензодатчики), закрепляемые в различных точках контролируемой конструкции [10-14]. Качество крепления датчиков, наличие высокого уровня шумов и вибрации во время полета, сильные электромагнитные поля и дополнительный вес делали системы встроенного контроля на прикрепляемых датчиках крайне ненадежными. Поэтому, вопрос о применении чувствительных элементов для контроля конструкции стоит наиболее остро.

Одним из перспективных чувствительных элементов для оптоволоконных датчиков является созданная в структуре оптического волокна брэгговская решетка (ВБР) [15-17]. ВБР в сравнении с традиционно применяемыми тензодатчиками более компактные, не подвержены электромагнитным помехам и могут интегрироваться в единое оптоволокно. Вместе с этим, оптоволокно достаточно легко интегрируется в ПКМ (например, в угле-, стекло-, органопластики и т. п.) в процессе изготовления элемента конструкции. Поэтому, одним из рассматриваемых вариантов расположения ВБР является их интеграция в структуру ПКМ в процессе изготовления детали. Благодаря своим преимуществам, ВБР начинают все шире применяться для системы встроенного контроля в ряде отраслей промышленности. В частности, исследуется возможность использования ВБР для изделий авиационной и космической техники, например, для измерения деформации материала в фрагменте фюзеляжа гражданского самолета В-737 и композитном баллоне, получаемом методом намотки с помощью внедряемых ВБР [18-20]. При этом следует отметить

важность точного определения деформаций материала в ключевых местах конструкций, как параметров, используемого при расчетах и контроле состояния.

Принцип работы волоконной брэгговской решетки основан на изменении ее периода, что приводит к смещению ее резонансной длины волны [21,22]. В частности, изменение размера оптоволокна вдоль его оси из-за приложения деформации или колебаний температуры окружающей среды вызывает изменение периода ВБР.

В данной статье описана методика измерения деформации (удлинения) образцов из углепластика с помощью интегрированных в его структуру волоконных брэгговских решеток и оценены погрешности измерения.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Материалы и методика исследований.

Для изготовления образцов углепластика использовали однонаправленный препрег марки ВКУ-47И на основе углеродного волокна IMS65 (Toho Tenax, Япония) и эпоксидного связующего ВСЭ-1212 (ФГУП «ВИАМ», Россия). Препрег был разрезан на заготовки длиной 290 мм и шириной 230 мм. Укладку препрега в пакете производили в одном направлении. Пакет состоял из 12-ти слоев препрега.

С целью измерения деформации в образце в процессе сборки пакета между 6-м и 7-м слоем укладывали в направлении упрочняющих волокон оптоволокно с сформированной ВБР, полученное от компании ООО «НЦВО-Фотоника» (Россия). Для изготовления чувствительных элементов на основе ВБР использовали стандартное одномодовое кварцевое оптическое волокно SMF-28 (диаметр кварцевого волокна составляет 125 мкм, а наружный диаметром полимерной оболочки – 250 мкм). В месте, предназначенном под запись ВБР, полимерное покрытие оптоволокна удаляли на 20 мм по его длине. ВБР записывали методом УФ облучения по центру отрезка с удаленным покрытием, протяженность участка оптоволокна с ВБР составила 10 мм. ВБР располагали по центру относительно длины и ширины рабочей части будущего образца. Аналогичным образом укладывали оптоволокно без ВБР для образцов, предназначенных для получения исходной диаграммы деформирования и определения физико-механических свойств материала.

Заготовку под образцы из углепластика изготавливали в лабораторных условиях прессовым методом. При формовании углепластика использовали специальную пресс-форму для организации вывода оптоволокна с поверхности будущего образца рядом с его рабочей частью.

Деформацию образца углепластика определяли вдоль оси его нагружения при испытании на растяжение по ГОСТ 25.601-80 при комнатной температуре на испытательной машине Zwick/Roell Z100. Образцы имели толщину 2 мм. Перед испытанием образца на его захватную часть приклеивали накладки, а для измерения его осевой деформации по его центру над местом интегрированной ВБР проводили аппликацию тензодатчика и устанавливали навесной экстензометр (рис.1).

Образец нагружали в области линейности диаграммы «напряжение – деформация» до начала микро-растрескивания материала, для чего вначале проводили испытания на растяжение других образцов этой партии углепластика с интегрированным оптоволокном аналогичным образом, но без ВБР с целью определения рабочего диапазона по деформации. Испытания проводили при

температуре $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ и влажности $(50\pm 5)\%$. При нагружении образца одновременно измеряли деформацию от экстензометра (измерительная база 25 мм), тензодатчика и ВБР. В процессе измерений принимали допущение, что температура образца постоянна.

Для определения деформации образца из углепластика с помощью ВБР, интегрированной в его структуру, использовали методику, основанную на калибровке образца. Вначале экспериментально определяли коэффициент пропорциональности между осевой деформацией интегрированного оптоволоконного датчика (ВБР) и осевой деформацией образца, измеренной с помощью тензодатчика. Затем при последующих испытаниях полученное значение деформации от ВБР умножали на определенный ранее коэффициент пропорциональности и получали осевую деформацию образца. Во время испытания осевую деформацию образца одновременно измеряли с помощью экстензометра, тензодатчика и ВБР. Применяли аксиальный навесной экстензометр «Epsilon» 3542 с базой измерения 25 мм (класс В-1 по ASTM E 83) и тензодатчик «TML» UFLA-3-350 с базой измерения 3 мм (сопротивление 350 Ом, максимальное удлинение 5 %) с тензостанцией «HBM Spider 8».

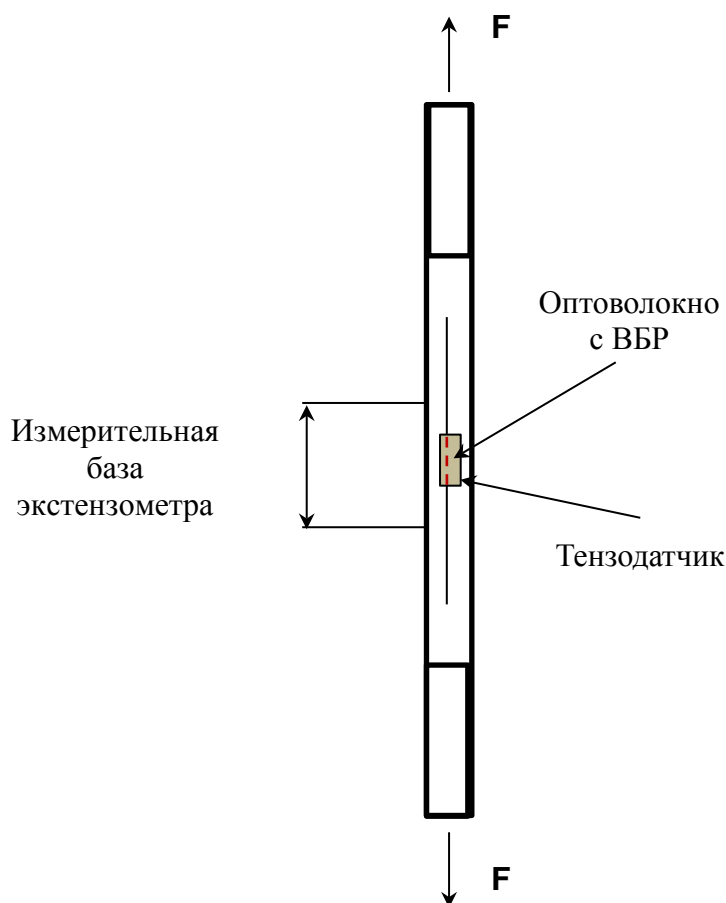


Рис.1. Схема расположения тензодатчика, экстензометра и ВБР (показана пунктиром) и направление приложения нагрузки к образцу.

Осевую деформацию оптоволоконного датчика определяли по формуле, приведенной в работе [23]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) \varepsilon_z \quad (1)$$

где: λ_B – резонансная длина волны ВБР; $\Delta\lambda_B$ – изменение резонансной длины волны ВБР; n_{eff} – показатель преломления кварцевого стекла; p_{11} , p_{12} – коэффициенты Поккелься упруго-оптического тензора; ν – коэффициент Пуассона кварцевого стекла; ε_z – осевая деформация оптоволокна.

Формулой (1) можно пользоваться, когда радиальная деформация оптоволокна вызвана его осевой деформации. В данной работе было принято такое допущение. Выражая осевую деформацию из формулы (1) и подставляя значения вышеуказанных постоянных ($n_{eff}=1,447467$; $p_{11}=0,113$; $p_{12}=0,252$; $\nu=0,19$ [23,24]) получаем

$$\varepsilon_z \approx \frac{\Delta\lambda_B}{0,809\lambda_B} \quad (2)$$

В работе также принимали допущение, что все слои в рабочей части образца в направлении приложения нагрузки деформируются равномерно.

2.2. Результаты исследований.

С целью определения линейной области диаграммы деформирования до начала микро-растрескивания материала и соответствующей ее максимальной деформации были проведены испытания образцов на растяжение. Верхний предел по деформации составил примерно 1%, что соответствует прочности при растяжении в 1630 МПа. Исходя из этого, а также с учетом разброса значений предела прочности данного углепластика (1519-1893 МПа), был выбран диапазон деформаций для калибровки интегрированной ВБР и последующих испытаний образца, который был ограничен величиной $\sim 0,8\%$. Следует отметить, что сравнительные испытания образцов показали, что снижение предела прочности при используемой схеме укладки оптоволокна в структуре углепластика по сравнению с такими же образцами без оптоволокна находится в пределах разброса его значений.

Далее производили калибровку интегрированной в структуру углепластика ВБР. Для этого нагружали образец с шагом примерно 1000 Н и записывали показания тензодатчика, экстензометра и определяли деформацию ВБР по формуле (2). Коэффициент пропорциональности (К) между деформацией тензодатчика и ВБР, а также осевая деформация образца приведены в таблице 1. На основе проведенных испытаний среднее значение коэффициента пропорциональности (К) составило 1,136.

На следующем этапе испытывали образцы, изготовленные из другой партии углепластика, в которых также была интегрирована ВБР. Используя ранее полученное значение коэффициента пропорциональности, определяли осевую деформацию образцов в процессе нагружения в упругой области. Результаты сравнительных измерений осевой деформации, определяемой с помощью тензодатчика, экстензометра и ВБР, одного из образцов приведены в таблице 2.

Таблица 1.

Коэффициент пропорциональности между деформацией тензодатчика и ВБР,
а также осевая деформация образца.

Растягивающее усилие, Н	Показание тензодатчика, %	Изменение длины волны, нм	Осевая деформация ВБР, %	Коэффициент пропорциональности (К) деформации между показанием тензодатчика и ВБР
0	0	0	0	-
1000	0,041	0,42	0,034	1,206
1990	0,082	0,92	0,073	1,123
2985	0,123	1,35	0,108	1,139
3980	0,164	1,84	0,147	1,116
4975	0,204	2,33	0,186	1,097
9880	0,416	4,53	0,361	1,148
14975	0,619	6,89	0,549	1,139
19940	0,818	9,08	0,724	1,121

Таблица 2.

Точность определения осевой деформации образца при измерениях с помощью ВБР по отношению к другим методам.

Нагрузка, Н	Отн. осевая деформация образца, измеренная тензодатчиком, %	Отн. осевая деформация образца, измеренная экстензометром, %	Отн. осевая деформация ВБР, %	Отн. осевая деформация образца, измеренная с помощью ВБР, %	Точность при сравнении показаний с тензодатчиком, %	Точность при сравнении показаний с экстензометром, %
0	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-
1000	0,042	0,042	0,035	0,040	5,3	5,3
1490	0,063	0,062	0,057	0,065	3,3	4
1998	0,084	0,083	0,074	0,084	0,4	1,3
2505	0,105	0,107	0,092	0,105	0,6	2,4
2992	0,123	0,123	0,114	0,130	5,3	5,3
3481	0,145	0,143	0,131	0,149	2,4	3,8
3979	0,166	0,163	0,148	0,168	1,4	2,9
4480	0,185	0,183	0,170	0,193	4,4	5,5
4980	0,206	0,202	0,187	0,212	3,1	5,2
5576	0,226	0,222	0,204	0,232	2,5	4,4
9890	0,421	0,419	0,365	0,415	1,51	1,0
14990	0,631	0,623	0,552	0,627	0,6	0,6
19955	0,829	0,825	0,736	0,836	0,9	1,3

На рис.2 приведены зависимости разниц в определении деформации от ее величины при сравнении ВБР с экстензометром, ВБР с тензодатчиком и тензодатчика с экстензометром. Результаты аппроксимаций по степенной зависимости $y=a \cdot x^b$ данных для каждого случая приведены в таблице 3. Коэффициенты a , b степенной зависимости подбирались методом наименьших

квадратов, минимизируя невязку экспериментальных данных к аналитической зависимости.

Таблица 3.

Коэффициенты аппроксимаций.

Зависимость	Коэффициент	
	a	b
ВБР – экстензометр	$0,0097 \pm 0,0026$	$0,31 \pm 0,17$
ВБР – тензодатчик	$0,0075 \pm 0,0019$	$0,34 \pm 0,17$
Тензодатчиком – экстензометр	$0,0067 \pm 0,0015$	$0,65 \pm 0,20$

Видно, что наилучшее совпадение в результатах определения деформации образца у пары тензодатчик – экстензометр, в то время как самые большие разницы в показаниях наблюдаются для пары ВБР – экстензометр. При этом увеличение разниц в определении деформаций между различными методами наблюдается в диапазоне деформаций от 0 до 0,2%. При более высоких значениях деформации от 0,2 до 0,8% величины разниц остаются постоянными в пределах погрешностей определения.

По результатам экспериментов точность определения деформации с использованием ВБР по отношению к результатам, полученным с помощью тензометрии и экстензометра, составила для одинаковых уровней нагрузок не более 6% при общей деформации до 0,83%, что соответствует разнице в определении осевой деформации не более чем в 0,012%.

Аналогичные результаты получены и для других образцов данного углепластика, изготовленных из других партий.

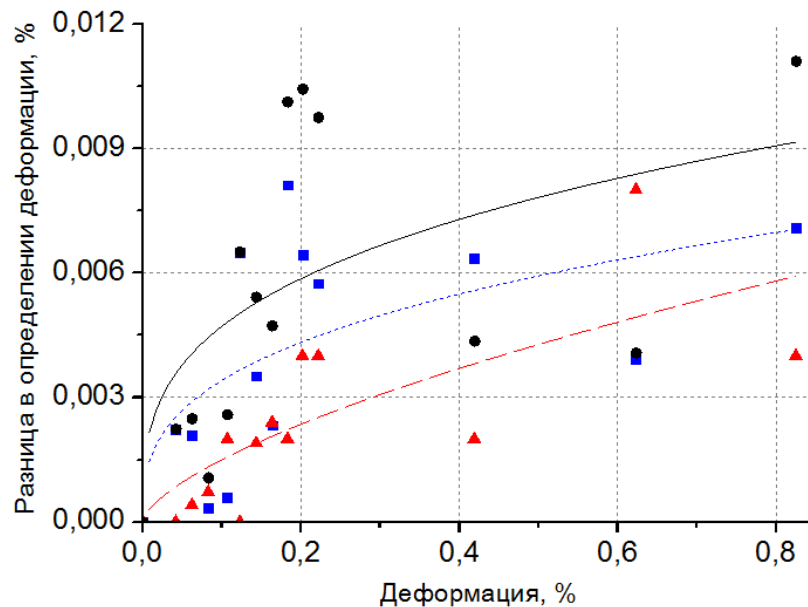


Рис.2. Зависимости разниц в определении деформации от ее величины при сравнении ВБР с экстензометром (●, —), ВБР с тензодатчиком (■, - - -), тензодатчика с экстензометром (▲, - - -) и их аппроксимации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен способ определения осевой составляющей деформации углепластика с использованием ВБР. Показано, что измерение деформации предложенным способом дает сравнимые результаты с измерениями с помощью экстензометра и тензодатчика. Точность определения деформации с использованием ВБР по отношению к результатам, полученным с помощью тензометрии и измерений экстензометром, составила для одинаковых уровней нагрузок не более 6% при общей деформации ~0,8%. Рассмотренная методика измерения может применяться при изучении фактического распределения осевой составляющей деформации в структуре полимерных композиционных материалов для образцов, которые работают, главным образом, на растяжение-сжатие. Данную методику измерения осевой составляющей деформации возможно применять и для элементов конструкций, которые допускают предварительное нагружения в рабочем диапазоне нагрузок перед началом эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фролов А.С., Панин С.В.* Оценка параметров влагопереноса углепластика авиационного назначения на начальной стадии натурной климатической экспозиции // Труды ВИАМ. – 2014. – №7. – Ст.08 (viam-works.ru).
2. *Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С.* Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // Труды ВИАМ. – 2014. – №7. – Ст.09 (viam-works.ru).
3. *Каблов Е.Н.* Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. – 2010. – №4. – С.2-7.
4. *Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Ерасов В.С., Яковлев Н.О.* Численное моделирование и экспериментальное исследование деформирования упругопластических пластин при смятии // Математическое моделирование и численные методы. – 2015. – №1 (5). – С.67-82.
5. *Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А.* Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №5. – С.440-448.
6. *Каблов Е.Н.* Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1 (34). – С.3-33.
7. *Димитриенко Ю.И., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А., Губарева Е.А., Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Крылов В.Д., Григорьев М.М., Федонюк Н.Н.* Разработка многослойного полимерного композиционного материала с дискретным конструктивно-ортотропным наполнителем // Композиты и наноструктуры. – 2014. – Т.6. – №1. – С.32-48.
8. *Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Гладких А.В., Гончаров А.А., Скиба О.В., Боярских А.В., Подживотов Н.Ю.* Испытания крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов на силовом полу ГЦКИ "ВИАМ" им. Г.В. Акимова // Композитный мир. – 2014. – №1. – С.72-78.
9. *Димитриенко Ю.И., Федонюк Н.Н., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А., Ерасов В.С., Яковлев Н.О.* Моделирование и разработка трехслойных композиционных материалов с сотовым наполнителем // Вестник

- Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. – 2014. – №5 (56). – С.66-81.
10. *Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е.* Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния // *Авиационные материалы и технологии.* – 2012. – №5. – С.242-253.
 11. *Федотов М.Ю., Сорокин К.В., Гуляев И.Н., Шиенок А.М.* Изменение геометрического профиля – инновационное решение для аэродинамики // *Авиационные материалы и технологии.* – 2012. – №4. – С.55-57.
 12. *Гуляев И.Н., Гуняев Г.М.* Использование непрерывных армирующих волокон в качестве тензорезисторных сенсорных элементов // *Авиационные материалы и технологии.* – 2010. – №2. – С.22-27.
 13. *Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А.* Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической системой // *Авиационные материалы и технологии.* – 2011. – №1. – С.31-34.
 14. *Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др.* Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // *Авиационные материалы и технологии.* – 2010. – №4. – С.17-20.
 15. *Васильев С.А., Медведков И.О., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М.* Волоконные решетки показателя преломления и их применение // *Квантовая электроника.* – 2005. – Т.35. – №12. – С.1085-1103.
 16. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала / Патент 2427795 Рос. Федерация. – Опубл. 03.12.2009.
 17. *Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J. et al.* Fiber grating sensors // *J. Lightwave Technol.* – 1997. – Vol.15. – P.1442-1463.
 18. *Takeda N.* Fiber optic sensor-based SHM technologies for aerospace applications in Japan / *Proc. SPIE 6933 «Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems».* – 2008. (<http://dx.doi.org>).
 19. *Takeda N., Tajima N., Sakurai T., Kishi T.* Recent advances in composite fuselage demonstration program for damage and health monitoring in Japan // *Structural control and health monitoring.* – 2005. – Vol.12. – P.245-255.
 20. *Childers B.A., Froggatt M.E., Allison S.G. et al.* Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four 8-m optical fibers during static load tests of a composite structure / *Proc. SPIE 4332 «Smart Structures and Materials–2001»: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies.* – 2001. (<http://dx.doi.org>).
 21. *Hill K.O., Meltz G.* Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // *J. Lightwave Technol.* – 1997. – Vol.15. – P.1263-1276.
 22. *Махсидов В.В., Федотов М.Ю., Шиенок А.М., Зуев М.А.* К вопросу об интеграции оптоволокон в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2014. – Т.20. – №4. – С.568-584.
 23. *Leduc D., Lecieux Y., Morvan P.-A., Lupi C.* Architecture of optical fiber sensor for the simultaneous measurement of axial and radial strains // *Smart Mater. Struct.* – 2013. – Vol.22. – P.9.

24. *Bertholds A., Dandliker R.* Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibers // *J. Lightwave Technol.* – 1988. – Vol.6. – P.17-20.

Поступила в редакцию 24 июля 2015 года.

Сведения об авторах:

Махсидов Владимир Владимирович – к.т.н., нач. сектора, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия; e-mail: makhsidov_vv@viam.ru

Яковлев Николай Олегович – к.т.н., н.с., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия

Ильичев Александр Владимирович – инж. 2-й кат., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия

Шиенок Антон Михайлович – инж. 2-й кат., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия