

УДК 681.586.5

**В.В. Махсидов, Л.А. Кашарина, А.А. Евдокимов, А.Е. Раскутин**

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», Москва, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ АВИАЦИОННЫХ  
И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В работе рассмотрены два метода определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием оптоволоконных сенсоров на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) на примере стандартных образцов и трехстрингерной панели из углепластика. Первый метод, основанный на измерении деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика, имеет погрешность 6 %. Такая методика рекомендована для стандартных образцов, например, применяемых для определения свойств ПКМ. Второй метод представляет собой модифицированный вариант первого и основан на калибровке по деформации, полученной в результате теоретического расчета конструкции в системе автоматизированного проектирования. Этот метод определения деформации ПКМ имеет погрешность 9 %. Модифицированный вариант калибровки имеет преимущество в том, что не требует разрушения изготовленной конструкции и позволяет калибровать конструкцию, имеющую труднодоступные места. По результатам данной работы был изготовлен демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ и разработана оптоволоконная система мониторинга деформации материала конструкции из ПКМ, установленная на возведенном арочном автомобильном двухполосном мосте в поселке Языково Ульяновской области.

**Ключевые слова:** оптоволоконный чувствительный элемент, волоконная брэгговская решетка, полимерный композиционный материал, углепластик, мониторинг, встроенный контроль.

**V.V. Makhsidov, L.A. Kasharina, A.A. Evdokimov, A.Ye.Raskutin**

FSUE «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials»,  
Moscow, Russian Federation

**APPLICATION OF FIBRE BRAGG GRATINGS FOR STRAIN  
MEASUREMENT OF AVIATION AND BUILDING STRUCTURES  
BASED ON POLYMER MATRIX COMPOSITE**

Fibre Bragg gratings (FBG) are a promising basis for sensor-based measurement of strain and begin more widely used in measuring systems for different designs. This paper examines the possibility of using FBG in the built-in control system designs from polymeric composite materials (PCM)

in a number of industries, in particular for structural elements of aircraft. There discusses two methods of strain measurements for PCM structures using fiber-optic sensors on the examples of standard samples and a three-stringer panel of carbon plastic. The first method is based on calibration by strain gage and has an inaccuracy of 6 %. This technique is recommended for standard samples, for example, used to determine properties of PCM. The second method is a modified version of the first and based on the calibration of strains obtained in the result of theoretical calculations using computer-aided software. The method has an inaccuracy of 9 %. A modified version of the calibration has the advantage that does not require the structure destruction and allows calibrating the design with the hard to reach places. In the case of aviation equipment, this method can be used during the strengthening test at the stage of certification. The modified method is recommended for the system of built-in control to obtain strains and loads of the PCM-structures.

**Keywords:** fibre optic sensor, fibre Bragg grating, strain, structural element, structural health monitoring.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в сравнении с традиционными материалами (сталь, алюминиевые и титановые сплавы и т.п.) обладают низким удельным весом, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и долговечностью. По этой причине растет объем применения ПКМ в различных отраслях промышленности, особенно в авиастроении, судостроении, железнодорожном транспорте, строительстве и др. [1–4]. Несмотря на очевидные преимущества ПКМ, существует ряд факторов, которые ограничивают их широкое применение в изделиях, эксплуатирующихся длительное время, например, в авиационной технике и в строительных объектах. В силу своей природы и особенностей технологии производства ПКМ в сравнении с алюминиевыми сплавами не могут накапливать повреждения, обладают гораздо большим разбросом значений свойств, способностью поглощать влагу из окружающей среды и под воздействием механической нагрузки разрушаются практически мгновенно [5–8]. Если для конструкций на основе алюминиевых сплавов накоплен большой опыт эксплуатации и существуют проверенные практикой методы оценки ресурса, то для конструкций на основе ПКМ такой опыт незначителен.

Вместе с тем для ряда изделий, например, военной или специальной авиации, некоторых строительных объектов, ресурс реальной конструкции и ресурс, определяемый расчетным методом, может значительно отличаться, что затрудняет оценку остаточного ресурса и обычно ведет к преждевременному съему и утилизации дорогостоящего узла или изделия в целом. Статистика для 70 самолётов F/A-18 показывает, что в течение 135 тысяч лётных часов скорость накопления повреждений различается примерно в 2 раза [9]. Такая разница в оценке прогнозируемого и реального ресурса связана с условиями эксплуата-

ции, и использование системы встроенного контроля для таких конструкций крайне актуально.

Перспективным с точки зрения встроенного контроля материала конструкции являются оптические волоконные датчики на основе брэгговской решетки [10, 11]. Волоконные брэгговские решетки (ВБР) в сравнении с традиционно применяемыми тензодатчиками более компактны, не подвержены электромагнитным помехам и могут интегрироваться в единое оптоволокно. Вместе с этим оптоволокно достаточно легко интегрируется в ПКМ (например, в угле-, стекло-, органопластике и т.п.) в процессе изготовления элемента конструкции. Различным вопросам определения деформации ПКМ с использованием ВБР посвящен отдельный пласт работ, среди которых следует отметить работу [12], направленную на измерение неоднородных полей деформации, что неразрывно связано с многими авиационными и строительными конструкциями, а также статью [13], посвященную решению главных вопросов в этой области.

Эксплуатация авиационной техники требует периодической диагностики конструкции и оценки ее остаточного ресурса. В ряде случаев необходима внеплановая проверка конструкции. Актуальность в системах мониторинга подтверждается тем, что на примере эксплуатации вертолётов УН-60 (1900 шт.) и АН-64 (725 шт.) в течение двух лет общий эффект за счёт применения бортовых систем мониторинга составил \$112 млн при одновременном снижении непредвиденных отказов техники, затрат на незапланированные осмотры и т.п. [14].

Благодаря своим преимуществам ВБР начинают применяться для систем встроенного контроля в авиационной, строительной, а также в других областях. Исследуется возможность использования ВБР для изделий авиационной и космической техники, например, для измерения деформации материала в фрагменте фюзеляжа гражданского самолета В-737 [15] и широкофюзеляжного типа А-350ХВ [16], измерения остаточных технологических деформаций углепластика космического назначения [17], а также для оптоволоконных детекторов транспортного потока [18].

В данной работе показаны способы определения деформации ПКМ с использованием оптоволоконных сенсоров на основе ВБР: калибровка изготовленной конструкции из ПКМ с интегрированной ВБР и его модификация с использованием «эталонной» деформации, полу-

ченной в результате расчета в системе автоматизированного проектирования (САПР) [19]. Преимуществами второго метода являются отсутствие необходимости разрушения изготовленной конструкции и возможность калибровки конструкции, имеющей труднодоступные места.

По результатам проведенных исследований был изготовлен демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ и разработана оптоволоконная система мониторинга деформации материала конструкции из ПКМ, установленная на возведенном арочном автомобильном двухполосном мосте через ручей Соловей в поселке Языково Ульяновской области. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 4.1 «Интеллектуальные ПКМ II и III поколений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### **1. Материалы и методика исследований**

Определение деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика проводили на стандартных образцах углепластика длиной, шириной и толщиной соответственно 250×10×2 мм. Для изготовления образцов использовали однонаправленный препрег марки ВКУ-47И на основе углеродного волокна IMS65 (Toho Tenax, Япония) и эпоксидного связующего ВСЭ-1212 (ФГУП «ВИАМ»). Пакет состоял из 12 слоев препрега, уложенных в одном направлении. С целью измерения деформации в образце в процессе сборки пакета между 6-м и 7-м слоем укладывали в направлении армирующих волокон оптоволокно со сформированной ВБР. Диаметр используемого кварцевого оптоволоконка составил 125 мкм, а наружный диаметр его полимерной оболочки – 250 мкм. Заготовку под образцы из углепластика изготавливали в лабораторных условиях прессовым методом. При формовании углепластика использовали специальную пресс-форму для организации вывода оптоволоконка с поверхности будущего образца в его переходной части (между рабочей и захватной частями). 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. Перед испытанием на захватную часть образца приклеивали наклейки. Для измерения продольной деформации по его центру над местом интегрированной ВБР проводили аппликацию тензодатчика, а на рабочую зону крепили навесной экстензометр с базой 25 мм.

Для определения деформации ПКМ вначале экспериментально определяли коэффициент пропорциональности между осевой деформацией интегрированного оптоволоконного датчика, содержащего ВБР, и продольной деформацией образца, измеренной с помощью тензодатчика. Осевую деформацию оптоволоконного датчика определяли по формуле, приведенной в работе [20]:

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

где  $\lambda_B$  – резонансная длина волны ВБР;  $\Delta\lambda_B$  – изменение резонансной длины волны ВБР;  $n_{\text{eff}}$  – показатель преломления кварцевого стекла;  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  – коэффициенты Поппельса упругооптического тензора;  $\nu$  – коэффициент Пуассона кварцевого стекла;  $\varepsilon_z$  – осевая деформация оптоволоконного датчика.

В работе были приняты два допущения. Первое: радиальная деформация оптоволоконного датчика вызвана его осевой деформацией, что позволило использовать формулу (1). Второе: для данного метода испытания все слои в рабочей части образца в направлении приложения нагрузки деформируются равномерно. Выражая осевую деформацию из формулы (1) и подставляя значения постоянных ( $n_{\text{eff}} = 1,447467$ ;  $p_{11} = 0,113$ ;  $p_{12} = 0,252$ ;  $\nu = 0,19$  [20, 21]), получаем:

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

Затем при последующих испытаниях полученное значение деформации от ВБР умножали на определенный ранее коэффициент пропорциональности и получали продольную деформацию образца. Во время испытания продольную деформацию образца одновременно измеряли с помощью экстензометра, тензодатчика и ВБР. Более подробно данная методика описана в работе [22].

Второй использованный метод определения деформации ПКМ с использованием интегрированных ВБР является модификацией пер-

вого и основывается на калибровке по расчетной деформации. Эксперимент проводили на трехстрингерных панелях из углепластика ВКУ-47И с интегрированными оптоволоконными сенсорами на основе ВБР. Данная панель является конструктивно подобным фрагментом верхней панели центроплана для модификации самолета Ту-204. Изначально в соответствии с действующими на элемент конструкции силовыми факторами и его расположением выбирали ориентацию слоев ПКМ и определяли геометрию поперечного сечения панели, проводя прочностной расчет. По полученным данным по автоклавной технологии из препрега ВКУ-47И были изготовлены трехстрингерные панели длиной 2000 мм и шириной 400 мм. Интеграцию оптоволоконна с ВБР проводили в определенный слой ПКМ обшивочной части панели под стрингером.

Методом конечно-элементного моделирования в САПР «ABAQUS» проводили анализ распределения деформаций по сечению трехстрингерной панели при ее нагружении. Для возможности последующей экспериментальной проверки этого метода и удобства закрепления панели в оснастке моделировали испытание на трехточечный изгиб (рабочая база 1500 мм): панель ориентирована обшивкой к опорам и стрингерами к нагружающему пуансону. При таком изгибе обшивка панели работает на растяжение. Нагружение трехстрингерной панели проводили на вертикальном стенде для испытаний крупногабаритных конструкций фирмы «Walter + Bai» AG (Швейцария) в ГЦКИ им. Г.В. Акимова (г. Геленджик) [23]. Для последующего расчета нагрузку на панель при изгибе принимали как 90 % (2575 кг) от разрушающей (2860 кг), определенной ранее при испытании аналогичной панели. Далее определяли коэффициент пропорциональности между рассчитанным значением деформации вдоль продольной оси панели и измеренным с помощью ВБР. На полученный коэффициент пропорциональности умножали значение деформации, измеренное ВБР с помощью формулы (2), и получали продольную деформацию материала в области с ВБР. В данном методе погрешность находили путем сравнения с деформацией, полученной из расчета в САПР.

## **2. Результаты исследований**

При определении деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика необходимо определить коэффициент пропор-

циональности между деформацией, измеряемой ВБР и определяемой тензодатчиком. В упоминаемой работе [22] для однонаправленных образцов углепластика марки ВКУ-47И коэффициент пропорциональности составил 1,136. По результатам экспериментов на образцах, изготовленных из различных партий, 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 образцов до 0,83 % (рис. 1).

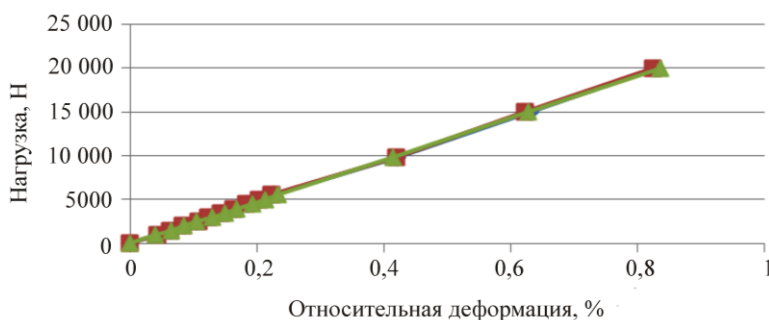


Рис. 1. Сравнение показаний деформации образцов ПКМ, измеренных с помощью тензодатчика, экстензометра и интегрированной ВБР:

— деформация образца, измеренная тензодатчиком; — деформация образца, измеренная экстензометром; — деформация образца, измеренная ВБР

Использование такого метода калибровки для оребренных панелей требует изготовления специальной оснастки под конкретные тип и размер детали, а главное — необходимость разрушения изготовленной конструкции, что неэкономично. Кроме того, невозможно калибровать конструкции, имеющие труднодоступные места для приклеивания тензодатчиков. Поэтому для определения деформации ПКМ в трехстрингерной панели с использованием ВБР был опробован метод калибровки по значениям деформации, полученным в теоретическом расчете (калибровка по расчетной деформации).

На рис. 2 в результате моделирования напряженно-деформированного состояния трехстрингерной панели при нагрузке, составляющей 90 % от разрушающей, показано распределение продольных деформаций вдоль ее продольной оси в слое с интегрированными оптоволоконными сенсорами на основе ВБР. По рассчитанным значениям

продольной деформации материала, полученным для соответствующих мест расположения ВБР и измеренным с помощью интегрированных ВБР в процессе эксперимента при той же нагрузке, определяли коэффициент пропорциональности между ними. Данный коэффициент использовали при определении деформации ПКМ в процессе испытаний для других изготовленных панелей.

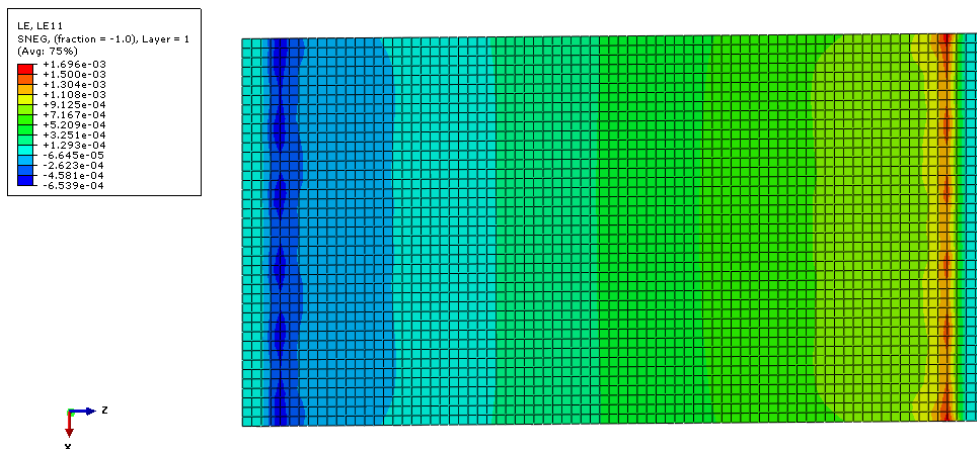


Рис. 2. Распределение продольных деформаций вдоль продольной оси в слое обшивки с оптоволоконными сенсорами в половине панели при трехточечном изгибе

На рис. 3 показаны экспериментальные значения продольных деформаций ПКМ, измеренных с помощью интегрированных ВБР, для другой трехстрингерной панели аналогичной конструкции в сравнении с расчетными данными. Погрешность определения деформации ПКМ с использованием ВБР по сравнению с расчетными данными составила 9 %. Более высокая погрешность по сравнению с первым методом предположительно связана с колебаниями размеров сечения и толщины монослоев для исследуемых панелей, а также погрешностями расчета.

Аналогичный результат получен и на других панелях такой же геометрии и изготовленных из того же материала той же технологией. Этот метод калибровки был опробован для приложения нагрузки к испытываемой панели в 10 % от разрушающей, который также показал погрешность определения деформации ПКМ в пределах 9 %.

Рассмотренный метод определения деформации ПКМ при калибровке по расчетной деформации возможно применять и для сенсоров



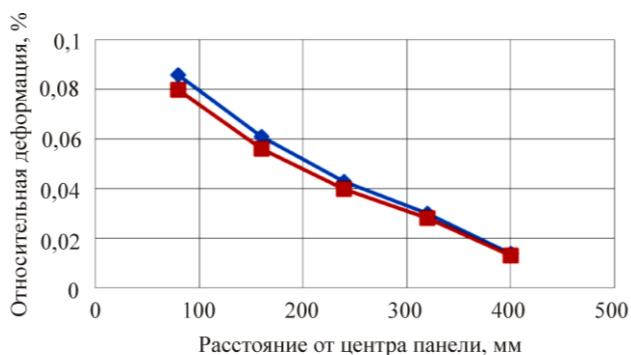


Рис. 3. Измеренные с помощью интегрированных ВБР и расчетные значения продольных деформаций ПКМ для трехстрингерной панели из углепластика ВКУ-47И: — — измеренные с помощью ВБР; — — расчетные данные

на основе ВБР, позволяющих одновременно измерять продольную и поперечную составляющую деформации материала [24].

На основе разработанного метода определения деформации ПКМ при калибровке по расчетной деформации изготовлен демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ. Демонстратор состоит из трехстрингерной панели из углепластика ВКУ-47И с интегрированными в структуру материала ВБР, устройства опроса ВБР (интеррогатор) и мобильного компьютера с установленным специальным программным обеспечением (рис. 4). Демонстратор позволяет контролировать до 30 зон с частотой до 100 Гц.

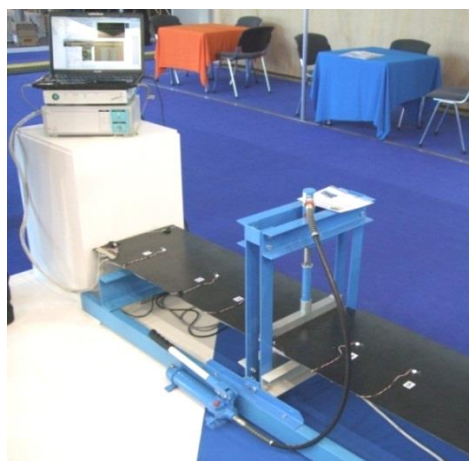


Рис. 4. Демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных ВБР (на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ)

С учетом полученных результатов определения деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика в ФГУП «ВИАМ» разработана оптоволоконная система мониторинга строительных конструкций с использованием ВБР, интегрируемых на поверхность элемента конструкции из ПКМ. Данная система установлена и запущена в тестовую эксплуатацию на возведенном арочном автомобильном двухполосном мосте через ручей Соловей в поселке Языково Карсунского района Ульяновской области (рис. 5).



*а*



*б*



*в*

Рис. 5. Арочный автомобильный двухполосный мост в поселке Языково Ульяновской области: *а, б* – общий вид; *в* – блок-контейнер с измерительным оборудованием

### **Заключение**

В работе рассмотрены два метода определения деформации материала вдоль продольной оси конструкции из ПКМ с использованием оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере стандартных об-

разцов и трехстрингерной панели из углепластика ВКУ-47И. Показано, что измерение деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика дает результат с погрешностью до 6 %. Однако данный метод не реализуем для использования на готовых конструкциях, особенно крупногабаритных и имеющих труднодоступные места. Такая методика рекомендована для стандартных образцов, например, применяемых для определения свойств ПКМ.

При использовании модифицированного метода, в котором калибровка осуществляется по деформации, полученной от соответствующего теоретического расчета конструкции в САПР, погрешность определения деформации ПКМ составила 9 %. Более высокая погрешность по сравнению с первым методом предположительно связана с колебаниями размеров сечения и толщины монослоев для исследуемых панелей, а также погрешностями расчета. Этот метод имеет преимущество перед первым в том, что не требует разрушения изготовленной конструкции и позволяет калибровать конструкцию, имеющую труднодоступные места. В случае авиационной техники этот метод может быть реализован при прочностных испытаниях конструкции и ее элементов на этапе сертификации воздушного судна. Для определения деформаций и нагрузок в конструкциях из ПКМ в системе встроенного контроля рекомендуется использовать модифицированный метод расчета на основе калибровки по деформации, полученной от соответствующего теоретического расчета конструкции в САПР.

### **Список литературы**

1. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. – М.: Изд-во ВИАМ, 2007. – С. 20–26.
3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. – 2010. – № 4. – С. 2–7.

4. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России / М.С. Дориомедов, М.И. Дасковский, С.Ю. Скрипачев, Е.А. Шеин // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2016. – № 7. – Ст. 12. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12

5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 440–448.

6. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III: Значимые факторы / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 34–40.

7. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 3. – С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66

8. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1. – С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55

9. Molent L., Agius J. Agile Military Aircraft. Chapter 98 // Encyclopedia of Structural Health Monitoring / John Wiley & Sons, Ltd. – 2009. – P. 1–15.

10. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С.А. Васильев, И.О. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.

11. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала: пат. 2427795 Рос. Федерация; опубл. 03.12.2009.

12. Измерение неоднородных полей деформации встроенными в полимерный композиционный материал волоконно оптическими датчиками / А.Н. Аношкин, А.А. Воронков, Н.А. Кошелева, В.П. Матвеевко, Г.С. Сероваев, Е.М. Спаскова, И.Н. Шардаков, Г.С. Шипунов // Известия Рос. акад. наук. Механика твердого тела. – 2016. – № 5. – С. 42–51.

13. Назиров М.Ф., Жуков Ю.А., Лыкова К.А. Измерение деформированного состояния образцов с помощью оптоволоконных датчиков, внедрённых в структуру композиционного материала // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 9–10. – С. 95–101.

14. Adams C. HUMS Technology // Avionics Magazine. – 2012. – URL: [http://www.aviationtoday.com/av/military/HUMS-technology\\_76209.html#](http://www.aviationtoday.com/av/military/HUMS-technology_76209.html#). VXbcJtLtlBc (дата обращения: 05.06.2015).

15. Recent advances in composite fuselage demonstration program for damage and health monitoring in Japan / N. Takeda, N. Tajima, T. Sakurai, T. Kishi // Structural control and health monitoring. – 2005. – Vol. 12. – P. 245–255.

16. Проект «SARISTU» – «Smart Intelligent Aircraft Structures»: офиц. сайт. – URL: [www.saristu.eu](http://www.saristu.eu) (дата обращения: 30.03.2017).

17. Михайловский К.В., Базанов М.А. Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путем внедрения в него волоконных брэгговских решеток // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – № 2. – С. 54–58.

18. Дыщенко В.С., Раскутин А.Е., Зуев М.А. Дорожный детектор в системах безостановочного автоматического взвешивания [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ. – 2016. – № 5. – Ст. 12. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-12-12

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. – 9 p.

20. 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.

21. 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.

22. «Измерение деформации углепластика с помощью интегрированных в его структуру волоконных брэгговских решеток» / В.В. Махсидов, Н.О. Яковлев, А.В. Ильичев, А.М. Шиенок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21. № 3. – С. 360–369.

23. Испытания крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов на силовом полу ГЦКИ «ВИАМ» им. Г.В. Акимова / В.С. Ерасов, Н.О. Яковлев, А.В. Гладких, А.А. Гончаров, О.В. Скиба, А.В. Боярских, Н.Ю. Подживотов // Композитный мир. – 2014. – № 1. – С. 72–78.

24. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: II. Experimental validation / E. Voet, G. Luycckx, W. De Waele, J. Degrieck // Smart Mater. Struct. – 2010. – Vol. 19. – 9 p.

Получено 02.11.17