

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ОДНОВРЕМЕННОГО ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

М. Ю. Федотов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация*

В работе показана актуальность совершенствования существующих и создания новых эффективных методов неразрушающего контроля и технической диагностики высоконагруженных конструкций летательных аппаратов из полимерных композитных материалов для обеспечения безопасной эксплуатации. Рассмотрены подходы к созданию эффективных систем одновременного встроенного контроля деформаций и температуры конструкций из полимерных композитных материалов оптическим методом с использованием интегрированных волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Проанализирован мировой опыт создания подобных систем, методология неразрушающего контроля с учетом создания пространственной топологии волоконно-оптических датчиков в реальном изделии. Показано, что для решения данной задачи наиболее целесообразно применение метода двух оптических волокон, имеющих различную чувствительность к деформации и температуре, либо к одному из этих параметров. Представлены результаты экспериментальных исследований по одновременному контролю предложенным методом деформации и температуры конструктивно-подобного образца из углекомпозиата, перерабатываемого вакуумным способом из препрега. Установлено, что применение квадратичной модели оптического контроля конструктивно-подобных образцов из углекомпозиата позволяет повысить точность измерений деформации и температуры в сравнении с линейной моделью контроля. Подтверждено, что предложенная экспериментальная методика позволяет осуществлять одновременный контроль деформации и температуры конструктивно-подобных образцов из углекомпозиатов, при этом она может быть скорректирована и адаптирована под реальные условия эксплуатации конкретной конструкции.

Ключевые слова: система одновременного встроенного контроля, полимерный композитный материал, конструктивно-подобный образец, пространственная топология, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, точность измерений.

Введение

Ключевым аспектом при создании новых и эксплуатации существующих изделий авиационно-космической техники является обеспечение безопасности эксплуатации [1]. Безопасность эксплуатации изделия – это комплексное понятие, распространяющееся как на конструкцию в целом, так и на все ее детали и узлы, если речь идет об обеспечении соответствия прочностных, ресурсных, эксплуатационных и иных параметров, значения которых регламентируются целым рядом

нормативных документов, например, нормами летной годности, указанными в «Авиационных правилах». При этом стоит отметить, что любая конструкция выполнена из конкретного материала, характеризующегося тем или иным комплексом свойств, что позволяет, сочетая такие материалы, получать необходимые характеристики конструкций, эксплуатирующихся в реальных условиях.

За последнее десятилетие для создания особо ответственных и высоконагруженных конструкций все шире начали применяться полимерные композитные материалы (ПКМ), сочетающие в себе высокие значения механических свойств и весовую эффективность в сравнении с традиционными металлическими материалами и сплавами [2; 3].

✉ fedotovmyu@gmail.com

Качество применяемых материалов и конструкций на их основе в значительной степени определяется методами неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики [4], позволяющими в ходе выполнения входного контроля, периодических и регламентных работ выявить критические дефекты на ранней стадии, обеспечивая тем самым безопасную эксплуатацию.

Новым направлением диагностики конструкций из ПКМ является применение так называемых систем встроенного контроля [5] деформации и температуры, например, за счет интеграции в материал конструкции на стадии ее изготовления волоконно-оптических датчиков (ВОД) [6], в том числе на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [7]. Подобные системы, в отличие от классических методов НК, позволяют осуществлять контроль деформации и температуры в режиме реального времени и сигнализировать о возникновении тех или иных внештатных ситуаций при превышении значений контролируемых параметров, обеспечивая в перспективе возможность эксплуатации по фактическому техническому состоянию [8; 9].

За рубежом термин «технология встроенного контроля» широко известен как Structural Health Monitoring (SHM) [10]. Особое внимание уделяется волоконно-оптическим системам встроенного контроля. Так, мировой рынок ВОД динамично развивается и суммарный оборот ВОД к концу 2023 года составит сумму более 1 млрд долларов США [11], что почти в 10 раз превышает уровень 2006 года.

Технологии встроенного контроля с использование ВОД на основе ВБР активно развиваются в таких известных компаниях, работающих в авиационной отрасли, как The Lockheed Martin Corporation (США) (например, модульный беспилотный летательный аппарат X-56, предназначенный для разведывательных целей), The Boeing Company (США) (например, штурмовик AV-8B Harrier), Airbus SE (Европейский союз) совместно с разработчиками ВОД и устройств их опроса – компаниями Luna Innovations (США), Epsilon Optics Limited (Великобритания), FBGS Technologies GmbH (Германия) и др.

Из открытых источников известно, что за последние годы за рубежом реализован целый ряд проектов в рассматриваемой области, в том числе комплексный европейский проект SARISTU (Smart Intelligent Aircraft Structures), выполненный совместно с ФАУ «ЦАГИ». В Российской Федерации данное направление также активно развивается в АО «ЦНИИССМ», ОКБ Сухого, АО «НЦВ им. М. Л. Миля и Н. И. Камова», АО «Композит», ООО НИЦ «ИРТ» и других компаниях совместно с ведущими техническими вузами, институтами Российской академии наук, а также разработчика-

ми отечественных волоконно-оптических систем встроенного контроля (ООО «Инверсия-Сенсор», ООО ИП «НЦВО – Фотоника» и др.).

Таким образом, анализируя информацию из открытых источников, стоит подчеркнуть, что данные технологии активно развиваются как в Российской Федерации, так и за рубежом, при этом достоверных сведений о серийном применении таких систем и особенностях их эксплуатации в реальных условиях нет, что, по-видимому, обусловлено спецификой применения для соответствующих конструкций.

Целью данной работы является разработка и реализация экспериментального метода одновременного встроенного контроля деформации и температуры конструкций из ПКМ с учетом особенностей формирования пространственной топологии ВОД на основе ВБР.

1. Подходы к созданию технологии одновременного встроенного контроля деформации и температуры композитных конструкций

В реальных условиях эксплуатации композитные конструкции зачастую находятся в сложнапряженном состоянии, при этом может также происходить одновременное воздействие температуры. С учетом этих обстоятельств необходимо создание эффективной технологии диагностики, позволяющей реализовать одновременный контроль как деформаций, так и температур в режиме реального времени. С учетом мирового опыта наиболее целесообразным видится создание волоконно-оптических систем встроенного контроля с использованием точечных и квази-распределенных ВОД на основе ВБР.

Так, в волоконной оптике существует целый ряд методов, позволяющих решать задачу одновременного измерения деформации и температуры, однако они не адаптированы для задачи контроля композитных конструкций. Среди них стоит выделить применение чирпированных ВБР [12], наклонных ВБР [13], суперструктурированных ВБР [14], ВБР, наложенных друг на друга по принципу суперпозиции [15], микроструктурированных ВБР [16]. Данные методы имеют целый ряд особенностей, которые нужно учитывать при создании систем встроенного контроля. Наиболее простым методом для решения рассматриваемой задачи является использование изолированного ВОД температуры, на показания которого не оказывают влияние механические воздействия. Это не всегда технически реализуемо на реальных конструкциях, поэтому не имеет широкого практического применения.

Наиболее эффективным методом видится использование метода двух волокон [17], заклю-

чающегося в том, что в качестве чувствительных элементов для точечных и квази-распределенных ВОД выступают ВБР, сформированные на разнолегируемых волоконных световодах (ВС), имеющих различную чувствительность к деформации и/или температуре.

С точки зрения метода двух волокон наиболее целесообразным видится последовательная топология ВОД в составе материала конструкции из ПКМ. Такая топология позволяет располагать массив ВОД в одной оптической линии и опрашивать их одним опросным устройством без использования дополнительных оптических волоконных компонентов. Таким образом, структурную оптическую схему расположения точечных ВОД на основе ВБР в составе квази-распределенной системы встроенного контроля ПКМ можно представить на рис. 1.

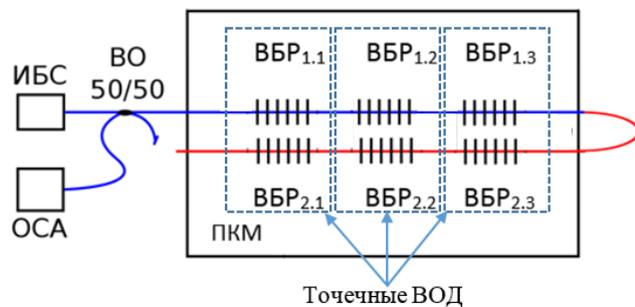


Рис. 1. Структурная оптическая схема расположения точечных ВОД на основе ВБР в составе квази-распределенной системы встроенного контроля ПКМ по методу двух волокон одним измерительным каналом: ИБС – источник белого света; ОСА – оптический спектроанализатор; ВО – волоконный ответвитель 50/50

На рис. 1 пунктиром обведены точечные ВОД, представляющие собой близкорасположенные ВБР, сформированные на разнолегируемых ВС. По 3 ВБР на каждом из разнолегируемых ВС приведены в качестве примера, их количество может быть увеличено в зависимости от спектрального диапазона опросного устройства. Эти ВС (условно красного и синего цветов), согласно схеме, соединяются между собой оптической сваркой вне ПКМ, что, с одной стороны, обеспечивает возможность их опроса одним измерительным каналом ОСА, с другой стороны, наличие незащищенного вывода ВС вне ПКМ не технологично с точки зрения механической обработки готового изделия. Возможной

$$\begin{cases} \Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T + K_{\varepsilon T} \Delta\varepsilon \Delta T \\ K_\varepsilon = K_{0\varepsilon} \cdot (1 + K_{1\varepsilon} \Delta\varepsilon) = K_{0\varepsilon} + K_{2\varepsilon} \Delta\varepsilon, & K_T = K_{0T} \cdot (1 + K_{1T} \Delta T) = K_{0T} + K_{2T} \Delta T \\ K_{0\varepsilon} = \frac{1}{\lambda_{B0}} \frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon}, K_{0T} = \frac{1}{\lambda_{B0}} \frac{\partial \lambda_B}{\partial T}, \\ K_{1\varepsilon} = \frac{1}{2\lambda_{B0} K_{0\varepsilon}} \frac{\partial^2 \lambda_B}{\partial \varepsilon^2}, K_{1T} = \frac{1}{2\lambda_{B0} K_{0T}} \frac{\partial^2 \lambda_B}{\partial T^2}, & K_{\varepsilon T} = \frac{1}{\lambda_{B0}} \left(\frac{\partial^2 \lambda_B}{\partial \varepsilon \partial T} \right) \end{cases} \quad (2)$$

модификацией схемы является расположение всего ВС в ПКМ, включая место сварки, однако, в этом случае, вследствие воздействия технологических режимов формования, а также особенностей схемы армирования ПКМ возможно механическое повреждение ВС в локальной области сварки.

С учетом этих особенностей целесообразно использовать альтернативную схему опроса (рис. 2).

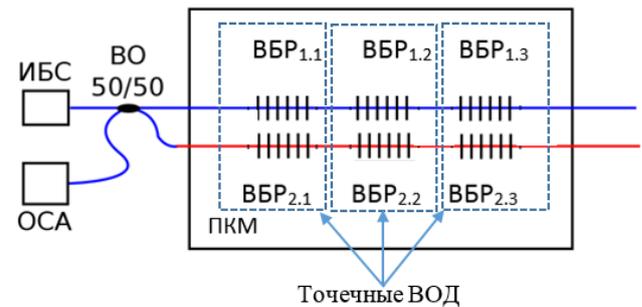


Рис. 2. Структурная оптическая схема опроса ВОД в составе ПКМ по методу двух волокон двумя параллельными измерительными каналами

Из рис. 2 видно, что сваривать ВС в рассматриваемом случае не требуется, так как данные поступают через ВО 50/50 из двух линий одновременно и регистрируются ОСА.

Приведем основные соотношения, поясняющие практическую реализацию метода двух волокон для одновременного встроенного контроля деформации и температуры.

Так, для ВБР справедливо условие фазового синхронизма [18]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{эф}} \Lambda, \quad (1)$$

где λ_B – резонансная длина волны ВБР, нм; $n_{\text{эф}}$ – эффективный показатель преломления основной моды ВС; Λ – период ВБР, нм.

На практике для реализации систем встроенного контроля ПКМ с помощью ВОД на основе ВБР удобно пользоваться относительными величинами. Пусть

$$\Delta_B = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}},$$

где $\Delta\lambda_B$ – изменение значения исходной резонансной длины волны ВБР λ_{B0} , нм. Тогда, раскладывая (1) в ряд Тейлора с точностью до второго члена, получим квадратичную модель оптического контроля в виде [19]:

где $\Delta\varepsilon$ [мкм/м] и ΔT [°C] – изменения значений деформации и температуры соответственно; K_ε [мкм/м]⁻¹ и K_T [°C⁻¹] – коэффициенты чувствительности ВБР к деформации и температуре соответственно; $K_{\varepsilon T}$ [°C мкм/м]⁻¹ – перекрестный коэффициент чувствительности ВБР, характеризующий величину изменения температурной чувствительности при изменении деформации и наоборот; индексы 0 и 1 обозначают соответствующие линейные и нелинейные коэффициенты чувствительности к деформации и температуре, индекс 2 характеризует квадратичные коэффициенты чувствительности к деформации и температуре.

Говоря о контроле конструкций из ПКМ, стоит отметить, что, например, у углекомполитов практически отсутствует пластическая деформация, а материал с некоторым допущением работает в упругой зоне, поэтому с высокой достоверностью может использоваться линейная модель оптического контроля [20]. Однако, если изменение температуры варьируется в широких пределах (например, 80 °C и более), целесообразно применять квадратичную модель (2).

Таким образом, для реализации предлагаемого метода одновременного контроля конструкций из ПКМ необходимо использовать пару ВС, имеющих существенно отличные деформационные и/или температурные коэффициенты. Тогда (2) примет вид [21]:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{B1} \\ \Delta_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \bar{K} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При постоянных коэффициентах \bar{K} (линейная модель оптического контроля) и $\det(\bar{K}) \neq 0$ уравнение (3) может быть решено аналитически:

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \bar{K}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta_{B1} \\ \Delta_{B2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Обратная матрица в данном случае выражается уравнением:

$$\bar{K}^{-1} = \frac{1}{\det(\bar{K})} \begin{pmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon 2} & K_{\varepsilon 1} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что при $\det(\bar{K}) \rightarrow 0$ погрешность в определении деформации и температуры существенно возрастает. Более строго этот вопрос формулируется при использовании числа обусловленности (Condition Number) Ω матрицы \bar{K} , которое является произведением норм прямой и обратной матриц и, в отличие от детерминанта, не имеет размерности и не зависит от используемых единиц измерения:

$$\Omega = \|\bar{K}\| \cdot \|\bar{K}^{-1}\|. \quad (6)$$

Число обусловленности показывает во сколько раз возрастает относительная погрешность при пересчете измеренных спектральных сдвигов резонансных длин волн ВБР в деформацию и тем-

пературу. Минимальное число обусловленности $\Omega = 1$ реализуется для единичной матрицы. К сожалению, для реальных конфигураций измерения в схемах с двумя ВБР число обусловленности матриц во много раз больше [22].

Таким образом, при использовании двух ВБР задача сводится к тому, чтобы спектральный отклик ВБР был существенно различен при изменении температуры или при приложении деформации, величину которой требуется измерить.

Конкретные виды деформаций конструкций из ПКМ, которые можно эффективно измерять с учетом одновременного температурного воздействия, используя различную топологию ВОД, подробно рассмотрены в [23].

2. Экспериментальные исследования и их обоснование

Экспериментальные исследования по одновременному контролю деформации и температуры конструктивно-подобных образцов из ПКМ интегрированной квази-распределенной системой ВОД на основе ВБР проводились по следующей методике:

- выбиралась пара коммерчески доступных ВС, обладающих различной чувствительностью к температуре, при сравнительно близких значениях чувствительности по деформации. Так в качестве ВС, обладающего сравнительно низкой температурной чувствительностью, был выбран кварцевый ВС PS1250-125/250, легированный бором в акрилатном защитном покрытии диаметром 250 мкм. В качестве ВС, имеющего более высокую температурную чувствительность, был выбран кварцевый ВС SM1500P-125/15, легированный германием, в полиимидном защитном покрытии диаметром 150 мкм;

- с целью повышения механической стойкости выбранных ВС при интеграции в ПКМ формирование ВБР осуществлялось методом фемтосекундной записи без снятия защитных оболочек ВС. На каждый ВС было записано по 3 ВБР с геометрической длиной 2 мм на расстоянии 50 мм друг от друга;

- проводился раскрой препрега и выкладка заготовок конструктивно-подобных образцов для вакуумного формования углекомполита на основе среднемодульного углеродного жгута 24К и эпоксидного связующего согласно заданной схеме армирования для данного типа образцов. Заготовка представляла собой плоскую плиту 500×500×5 мм с квази-изотропной схемой армирования. Понятие конструктивно-подобный образец в рассматриваемом случае означает, что данный тип образца является фрагментом несущей обшивки крыла из ПКМ с эквивалентной толщиной и схемой армирования;

- осуществлялось формирование квази-распределенной системы ВОД на основе ВБР согласно структурной оптической схеме (рис. 2). Таким образом, выбранные ВС с ВБР выкладывались параллельно между слоями препрега, один из которых имел направление армирования $[0]_n$, другой – $[45]_n$, причем расстояние между ВС составляло 5 мм, а ВБР позиционировались вручную друг напротив друга, тем самым формируя массив точечных ВОД, состоящих из ВБР, сформированных на разнолегируемых ВС, расположенных сравнительно близко друг к другу. Вывод ВОД осуществлялся через поверхность с использованием фторопластовых трубок, обеспечивающих механическую целостность ВС в зоне ввода/вывода как в процессе изготовления конструктивно-подобных образцов, так и при механической обработке и проведении стендовых испытаний;

- осуществлялась финальная сборка пакета заготовки препрега, вывод ВОД через поверхность заготовки, закрепление выводов ВОД на антиадгезионной пленке, сборка вакуумного мешка, формование заготовки по штатному режиму для данного конструктивно-подобного образца из выбранного материала;

- проводилась механическая обработка отформованной заготовки и формирование конструктивно-подобных образцов (5 шт.) с интегрированными квази-распределенными ВОД на основе ВБР, сформированными на разнолегируемых ВС для обеспечения возможности одновременно контроля деформации и температуры;

- перед проведением стендовых механических испытаний конструктивно-подобных образцов с одновременным воздействием изменяющейся температуры в целях обеспечения корректности данных от системы встроенного контроля на основе квази-распределенных ВОД и механической целостности образцов в зоне захватов испытательной машины осуществлялась наклейка накладок из стеклотекстолита КАСТ-В толщиной 2 мм с помощью пленочного клея ВК-36;

- подготовленные конструктивно-подобные образцы поочередно помещались в захваты испытательной машины типа LFM-250, оснащенной термокамерой и экстензометром, выводы ВОД зачищались с помощью стриппера типа ЛС-375, осуществлялось скалывание зачищенных участков ВС при помощи скалывателя типа VF-77, после чего осуществлялась оптическая сварка подготовленных выводов ВОД с пигтейлами, оконцованными разъемами FC/APC, и защита места сварки с помощью соответствующего комплекта защиты для сварки. Пара пигтейлов, приваренных к выводам ВОД, с помощью разъемов подсоединялась к устройству опроса ВОД ASTRO A312 (Российская Федерация, г. Пермь) с разрешени-

ем по длине волны 1 пм, которое, в свою очередь, подключалось к персональному компьютеру (ПК) с установленным программным обеспечением (ПО) Astrosoft;

- проводился процесс калибровки, в ходе которого экспериментально определялись соответствующие линейные и нелинейные коэффициенты чувствительности к деформации и температуре $K_{0\epsilon}$, $K_{2\epsilon}$, K_{0T} , K_{2T} , $K_{\epsilon T}$ для всех интегрированных ВОД на основе ВБР;

- проводились стендовые испытания конструктивно-подобных образцов (5 шт.) с одновременной регистрацией данных от интегрированной квази-распределенной системы на основе ВОД. В ходе испытаний образцы выдерживали при температурах +30, +55, +80, +100 и +120 °С. При каждой температуре производился цикл нагрузки-разгрузки на статическое растяжение-сжатие до 2,5 кН с шагом 0,5 кН. Смещения длин волн ВБР измерялись с частотой 1 Гц;

- определялась погрешность измерений деформации и температуры конструктивно-подобного образца из углекомпозиата методом двух волокон для выбранной пары ВС.

Структурная схема проведения эксперимента показана на рис. 3.

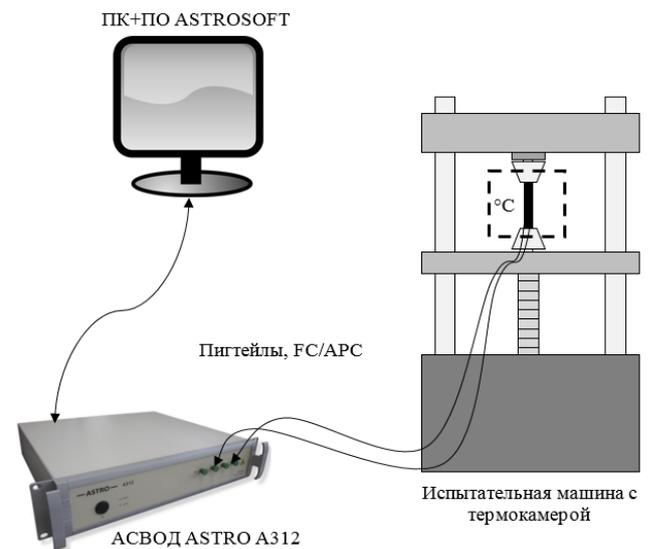


Рис. 3. Структурная схема проведения эксперимента

На рис. 4 представлены спектры отражения ВБР, интегрированных в конструктивно-подобный образец из углекомпозиата. Спектры отражения (амплитудно-частотные характеристики) ВБР обведены рамками.

В полученных спектрах наблюдается высокий уровень боковых лепестков, обусловленный особенностями метода фемтосекундной записи ВБР. Как видно из рис. 4, после интеграции в конструктивно-подобный образец форма спектра ВБР не претерпела существенных изменений, что позволило определять положения пиков ВБР,

используя стандартные алгоритмы. ВБР в волокне SMP1500P (зеленые) имеют малые потери на рассеяние. ВБР в волокне PS1250 (красные) наоборот имеют большие потери, предположительно на рассеяние, что подтверждается убыванием интенсивности от пика к пику. Это, по-видимому, обусловлено участием оболочечных мод в формировании спектра отражения.

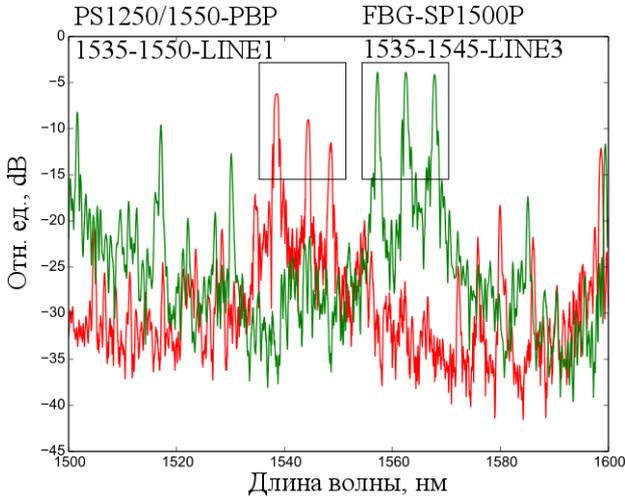


Рис. 4. Спектры отражения ВБР в составе конструктивно-подобного образца из углекомпозиата

В результате эксперимента получены смещения резонансных длин волн ВБР, интегрированных в конструктивно-подобный образец из углекомпозиата. Так, было установлено, что ВБР, записанные в ВС PS1250-125/250, имеют большую чувствительность к температуре, чем ВБР в ВС SM1500P-125/150. Такое увеличение чувствительности ВБР в ВС PS1250, по-видимому, обусловлено влиянием эффекта многомодовой интерференции, т. е. оболочечных мод, при этом показатель преломления под воздействием температуры изменяется сильнее благодаря фемтомодификации сердцевины ВС.

Также экспериментально установлено, что ВБР, записанные в ВС SM1500P-125/150, имеют большую чувствительность к деформации. Это, в свою очередь, обусловлено тем, что полиимидное защитное покрытие данного ВС имеет лучшую адгезию с полимерной матрицей углекомпозиата и, вследствие этого обстоятельства, лучше передает деформацию. При этом с ростом температуры данные квази-распределенных ВОД существенно расходятся, что, возможно, связано с разной степенью влияния оболочечных мод на коэффициенты чувствительности. Косвенно на это указывает тот факт, что для ВС PS1250 расхождение больше, чем для ВС SM1500P.

Экспериментальные исследования по одновременному контролю деформации и температуры конструктивно-подобных образцов с оценкой погрешности метода двух волокон ($\delta\epsilon, \delta T$) для вы-

бранной пары ВС с ВБР проводились как с помощью линейной модели:

$$\begin{cases} \Delta_{0B1} = (K_{0\epsilon})_1 \Delta\epsilon + (K_{0T})_1 \Delta T \\ \Delta_{0B2} = (K_{0\epsilon})_2 \Delta\epsilon + (K_{0T})_2 \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

так и с помощью квадратичной модели оптического контроля, учитывающей как квадратичные члены, так и перекрестную чувствительность:

$$\begin{cases} \Delta_{2B1} = (K_{0\epsilon})_1 \Delta\epsilon + (K_{0T})_1 \Delta T + (K_{2\epsilon})_1 \Delta\epsilon^2 + \\ \quad + (K_{\epsilon T})_1 \Delta\epsilon \Delta T + (K_{2T})_1 \Delta T^2 \\ \Delta_{2B2} = (K_{0\epsilon})_2 \Delta\epsilon + (K_{0T})_2 \Delta T + (K_{2\epsilon})_2 \Delta\epsilon^2 + \\ \quad + (K_{\epsilon T})_2 \Delta\epsilon \Delta T + (K_{2T})_2 \Delta T^2 \end{cases} \quad (8)$$

Результаты экспериментальных исследований, полученные с помощью линейной модели для одного из конструктивно-подобных образцов, приведены в табл. 1 и на рис. 5.

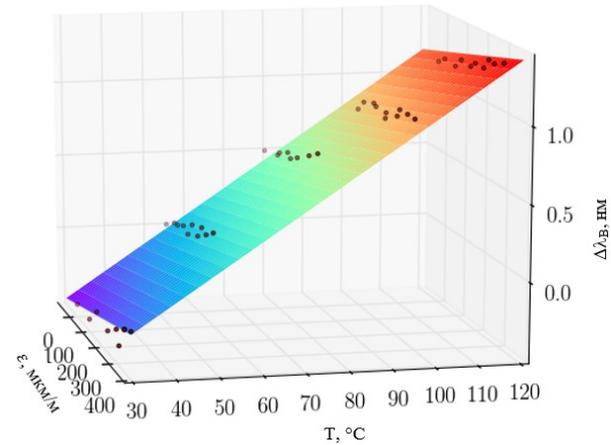


Рис. 5. Поле смещений длины волн ВБР от деформации и температуры (линейная модель)

Анализируя полученные результаты контроля, стоит отметить, что полученные значения погрешностей довольно высокие. В целях снижения значений погрешности контроля измеряемых параметров была применена квадратичная модель оптического контроля.

Результаты экспериментальных исследований, полученные с помощью квадратичной модели оптического контроля для того же конструктивно-подобного образца, приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Анализируя полученные результаты одновременного контроля деформации и температуры конструктивно-подобного образца, стоит отметить, что для выбранной пары ВС (PS1250-125/250 и SM1500P-125/150) погрешность определения деформации и температуры составила (2,1–3,6) °C и (42–114) мкм/м в диапазонах (30–120) °C и (0–400) мкм/м, соответственно. Полученные экспериментальные данные хорошо соотносятся с ранее полученными данными [24], что говорит о достоверности результатов контроля.

Таблица 1

Результаты оптического контроля по линейной модели

№ п/п	PS1250-125/250	SM1500P-125/150
1	$(K_{0\varepsilon})_1 = 0,52 \text{ пм} \cdot (\text{мкм}/\text{м})^{-1}$	$(K_{0\varepsilon})_2 = 0,12 \text{ пм} \cdot (\text{мкм}/\text{м})^{-1}$
2	$(K_{0T})_1 = 18,32 \text{ пм}/^\circ\text{C}$	$(K_{0T})_2 = 11,38 \text{ пм}/^\circ\text{C}$
3	Погрешности измерений: $\delta\varepsilon_{\text{cp}} = 120,5 \text{ мкм}/\text{м}$, $\delta T_{\text{cp}} = 5,6 \text{ }^\circ\text{C}$	

Таблица 2

Результаты оптического контроля по квадратичной модели

№ п/п	BC PS1250-125/250	BC SM1500P-125/150
1	$(K_{0\varepsilon})_1 = 0,43 \text{ пм} \cdot (\text{мкм}/\text{м})^{-1}$	$(K_{0\varepsilon})_2 = 0,11 \text{ пм} \cdot (\text{мкм}/\text{м})^{-1}$
2	$(K_{2\varepsilon})_1 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ пм} \cdot (\text{мкм}/\text{м})^{-2}$	$(K_{2\varepsilon})_2 = -0,23 \cdot 10^{-3} \text{ пм} \cdot (\text{мкм}/\text{м})^{-2}$
3	$(K_{0T})_1 = 22,38 \text{ пм}/^\circ\text{C}$	$(K_{0T})_2 = 17,02 \text{ пм}/^\circ\text{C}$
4	$(K_{2T})_1 = -5,4 \cdot 10^{-2} \text{ пм}/^\circ\text{C}^2$	$(K_{2T})_2 = -8,1 \cdot 10^{-2} \text{ пм}/^\circ\text{C}^2$
5	$(K_{\varepsilon T})_1 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ пм}/(^\circ\text{C} \cdot (\text{мкм}/\text{м}))$	$(K_{\varepsilon T})_2 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ пм}/(^\circ\text{C} \cdot (\text{мкм}/\text{м}))$
6	Погрешности измерений: $\delta\varepsilon_{\text{cp}} = 78 \text{ мкм}/\text{м}$, $\delta T_{\text{cp}} = 2,9 \text{ }^\circ\text{C}$	

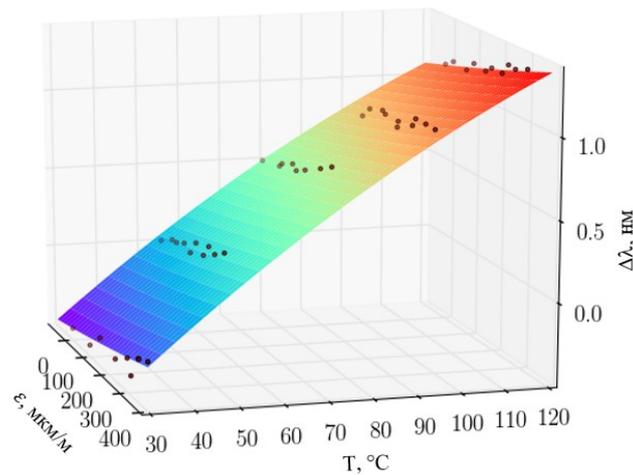


Рис. 6. Поле смещений длины волны ВБР от деформации и температуры (квадратичная модель)

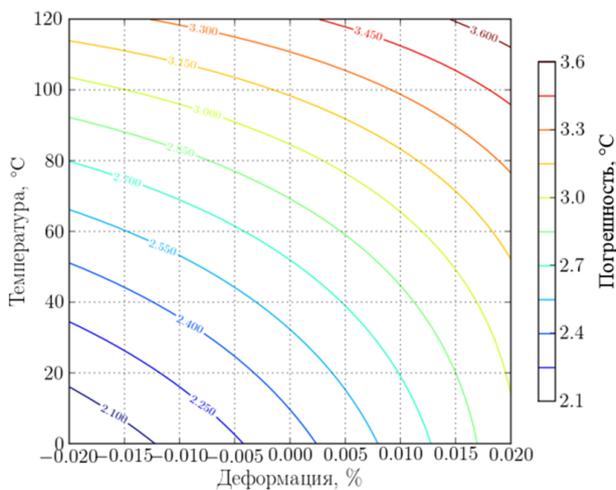


Рис. 7. Погрешность измерения температуры методом двух волокон (квадратичная модель)

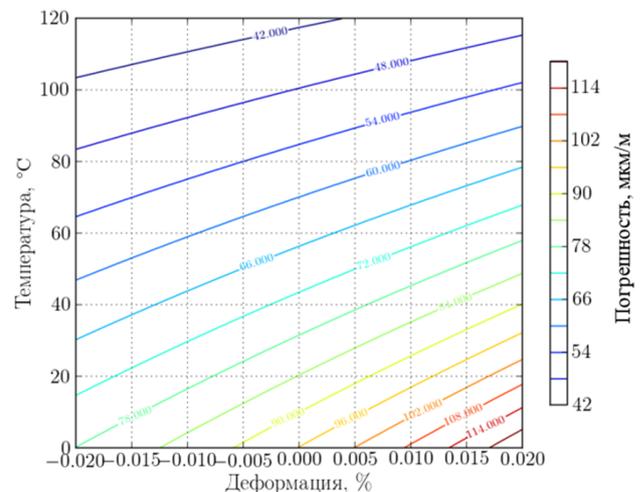


Рис. 8. Погрешность деформации методом двух волокон (квадратичная модель)

Дополнительно стоит отметить, что использование квадратичной модели оптического контроля позволяет повысить точность определения деформации и температуры в 1,5–2,0 раза в сравнении с линейной моделью.

Заключение

Применение волоконно-оптических систем встроенного контроля перспективных изделий авиационно-космической техники из ПКМ является эффективным инструментом обеспечения безопасности эксплуатации, в перспективе – по техническому состоянию в режиме реального времени.

В общем случае на реальную конструкцию воздействуют как механические, так и тепловые нагрузки, поэтому целесообразным видится создание эффективной системы встроенного контроля, обеспечивающей возможность измерения деформации и температуры в режиме реального времени. По результатам анализа научно-технической информации из открытых источников наиболее

целесообразным видится создание подобных систем на основе метода двух волокон, имеющих различную чувствительность хотя бы к одному из измеряемых параметров.

По результатам проведения экспериментальных исследований разработана экспериментальная методика по одновременному контролю деформации и температуры конструктивно-подобных образцов из углекомпозиата, подтверждающая эффективность предложенных технических решений, при этом установлено, что для повышения достоверности результатов контроля целесообразно применять квадратичную модель оптического контроля.

Важным фактором, коренным образом влияющим на достоверность контроля, является обеспечение существенного различия коэффициентов чувствительности ВС с ВБР к деформациям и температурам, определяющимся числом обусловленности. Это обстоятельство требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Список литературы

- [1] Кокарев А. С., Птушкин А. И., Марченко М. А. Обеспечение безопасности космической деятельности НАСА // *Информация и космос*. 2016. № 4. С. 172–180.
- [2] Ковтунов С. С., Насонов Ф. А. Разработка материала ПКМ со сверхмалой концентрацией ОУНТ с целью повышения усталостных характеристик для применения в сверхзвуковом пассажирском самолете нового поколения // *Тезисы I Международной научно-технической конференции «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения»*. М. 2022. С. 56–58.
- [3] Гуняева А. Г., Курносоев А. О., Гуляев И. Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // *ТРУДЫ ВИАМ*. 2021. № 1 (95). С. 43–53. doi: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
- [4] Козельская С. О., Акимов Д. А., Андреев А. С., Будадин О. Н., Котельников В. В. Применение глубинных нейронных сетей на основе паллитивного анализа в условиях неполной информации оптико-теплого и электрического неразрушающего контроля для прогнозирования предельного ресурса эксплуатации конструкций из композитных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2021. Т. 24. № 3 (273). С. 4–15. doi: 10.14489/td.2021.03.pp.004-015.
- [5] Железина Г. Ф., Сиваков Д. В., Гуляев И. Н. Встроенный контроль: от датчиков до информкомполитов // *Авиационная промышленность*. 2008. № 3. С. 46–50.
- [6] Хабаров С. С., Комшин А. С. Применение волоконно-оптической измерительной технологии и фазохронометрического метода для контроля и мониторинга технического состояния конструкций летательных аппаратов // *Измерительная техника*. 2021. № 2. С. 49–56. doi: 10.32446/0368-1025it.2021-2-49-56.
- [7] Анискович В. А., Будадин О. Н., Заикина Н. Л., Кутюрин В. Ю., Муханова Т. А., Разин А. Ф., Соловей А. В., Водопьянов В. А. Измерение деформаций с использованием волоконно-оптических датчиков в процессе прочностных испытаний анизотропных конструкций из композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2018. № 7. С. 44–49. doi: 10.14489/td.2018.07.pp.044-049.
- [8] Свирский Ю. А., Трунин Ю. П., Панков А. В., Зайцев М. Д., Фагалов В. Ф. Бортовые системы мониторинга (БСМ) и перспективы применения в них волоконно-оптических датчиков // *Композиты и наноструктуры*. 2017. Т. 9. № 1 (33). С. 35–44.
- [9] Баутин А. А., Свирский Ю. А., Панков А. В., Воронков Р. В. Способы применения волоконно-оптических датчиков деформаций в системах мониторинга // *Прикладная фотоника*. 2018. Т. 5. № 4. С. 391–407. doi: 10.15593/2411-4367/2018.4.07.
- [10] Kinet D., Megret P., Goossen K. W., Liang Q., Heider D., Caucheteur Ch. Fiber bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions // *Sensors*. 2014. vol. 14. no. 4. pp. 7394–7419. doi: 10.3390/s140407394.

- [11] Bado M. F., Casas J. R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring // *Sensors*. 2021. vol. 21. no. 5. doi: 10.3390/s21051818.
- [12] Frazao O., Melo M., Marques P. V. S., Santos J. L. Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain–temperature discrimination // *Measurement Science and Technology*. 2005. vol. 16. no. 4. pp. 984–988. doi: 10.1088/0957-0233/16/4/010.
- [13] Chehura E., James S. W., Tatam R. P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating // *Optics Communications*. 2007. vol. 275. issue 2. pp. 344–347. doi: 10.1016/J.OPTCOM.2007.03.043.
- [14] Guan B. O., Tam H. Y., Tao X. M., Dong X. Y. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000. vol. 12. no. 6. pp. 675–677.
- [15] Demirel M., Robert L., Molimard J., Vautrin A., Orteu J.-J. Strain and Temperature Discrimination and Measurement Using Superimposed Fiber Bragg Grating Sensor // *Proceedings of the international conference «Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures»*. 2007. pp. 639–640. doi: 10.1007/978-1-4020-6239-1_317.
- [16] Wu C., Zhang Y., Guan B.-O. Simultaneous measurement of temperature and hydrostatic pressure using Bragg gratings in standard and grapefruit microstructured fibers // *IEEE Sensors Journal*. 2011. vol. 11. no. 2. pp. 489–492. doi: 10.1109/JSEN.2010.2068045.
- [17] Sivanesan P., Sirkis J. S., Murata Yo., Buckley S. G. Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneously measuring strain and temperature // *Optical Engineering*. 2002. vol. 41. no. 10. pp. 2456–2463. doi: 10.1364/AO.47.001668.
- [18] Kogelnik H. Theory of optical-waveguides in guided wave optoelectronics; Part of the Springer Series in Electronics and Photonics book series (SSEP). Springer-Verlag, Berlin. 1988. vol. 26. pp. 7–88.
- [19] Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О. Математическое моделирование и экспериментальные результаты контроля ПКМ волоконно-оптическими датчиками с учетом воздействия факторов, имитирующих реальные условия эксплуатации // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 4. С. 12–19. doi: 10.14489/td.2019.04.pp.012-019.
- [20] Федотов М. Ю., Гончаров В. А., Шиенок А. М., Сорокин К. В. Исследование изгибных деформаций углепластика оптоволоконными сенсорами на брэгговских решетках // *Вопросы материаловедения*. 2013. № 2 (74). С. 139–147.
- [21] Kalli K., Simpson A. G., Zhou K., Zhang L., Bennion I. Tailoring the temperature and strain coefficients of Type I and Type IA dual grating sensors – the impact of hydrogenation conditions // *Measurement Science and Technology*. 2006. vol. 17. no. 5. P. 949. doi: 10.1088/0957-0233/17/5/S02.
- [22] Haran F. M., Rew J. K., Foote P. D. A Fiber Bragg grating strain gauge rosette with temperature compensation // *Proceedings of the SPIE*. 1998. vol. 3330. pp. 220–230. doi: 10.1117/12.316977.
- [23] Budadin O., Vavilov V., Fedotov M., Vasiliev S., Gnusin P., Kozelskaya S., Kuimova M. Theoretical and Experimental Studies of Structural Health Monitoring of Carbon Composites with Integrated Optical Fiber Sensors Based on Fiber Bragg Gratings // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. vol. 40. no. 4. doi: 10.1007/s10921-021-00822-5.
- [24] Shishkin V. V., Terentyev V. S., Kharenko D. S., Dostovalov A. V., Wolf A. A., Simonov V. A., Fedotov M. Yu., Shienok A. M., Shelemba I. S., Babin S. A. Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // *Journal of Sensors*. 2016. vol. 2016. doi: 10.1155/2016/3230968.

FEATURES OF CREATING A SYSTEM OF SIMULTANEOUS BUILT-IN TESTING OF DEFORMATION AND TEMPERATURE OF COMPOSITE STRUCTURES BY FIBER-OPTIC SENSORS

M. Yu. Fedotov

*Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

This article describes the relevance of improving existing and creating new effective methods of non-destructive testing and technical diagnostics of highly loaded aircraft structures made of polymer composite materials to ensure safe operation. Approaches to the creation of efficient

systems for the simultaneous embedded testing of deformations and temperature of structures made of polymer composite materials by an optical method using embedded fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings are considered. The world experience in creating such systems, the methodology of non-destructive testing are analyzed, taking into account the creation of a spatial topology of fiber-optic sensors in a real product. It is shown that to solve this problem, it is most expedient to use the method of two optical fibers with different sensitivity to deformation and temperature, or to one of these parameters. The results of experimental studies on the simultaneous control by the proposed method of deformation and temperature of a structurally similar sample from a carbon composite processed by a vacuum method from a prepreg are presented. It has been established that the use of a quadratic model for optical control of structurally similar samples of carbon composite makes it possible to increase the accuracy of deformation and temperature measurements in comparison with the linear control model. It is confirmed that the proposed experimental technique allows for simultaneous control of deformation and temperature of structurally similar samples from carbon composites, while it can be adjusted and adapted to the actual operating conditions of a particular structure.

Keywords: simultaneous embedded testing system, polymer composite material, structurally similar sample, spatial topology, fiber-optic sensor, fiber Bragg grating, measurement accuracy.

References

- [1] Kokarev A. S., Ptushkin A. I., Marchenko M. A. *Obespechenie bezopasnosti kosmicheskoy deyatel'nosti NASA* [Ensuring the safety of NASA space activities] // Information and Space, 2016, no. 4, pp. 172–180. (In Russian)
- [2] Kovtunov S. S., Nasonov F. A. *Razrabotka materiala PKM so sverhmaloj koncentraciej OUNT s cel'yu povysheniya ustalostnykh harakteristik dlya primeneniya v sverhzvukovom passazhirskom samolete novogo pokoleniya* [Development of a PCM material with an ultra-low SWCNT concentration in order to improve fatigue characteristics for use in a new generation supersonic passenger aircraft] // Theses of the I International scientific-technical conference «Skorostnoj transport budushchego: perspektivy, problemy, resheniya», Moscow, 2022, pp. 56–58. (In Russian)
- [3] Gunyaeva A. G., Kurnosov A. O., Gulyaev I. N. *Vysokotemperaturnye polimernye kompozicionnye materialy, razrabotannye vo FGUP «VIAM», dlya aviacionno-kosmicheskoy tekhniki: proshloe, nastoyashchee, budushchee (obzor)* [High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review)] // Proceedings of VIAM, 2021, no. 1 (95), pp. 43–53. doi: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53. (In Russian)
- [4] Kozelskaya S. O., Akimov D. A., Andreev A. S., Budadin O. N., Kotelnikov V. V. *Primenenie glubinykh neyronnykh setej na osnove pallitivnogo analiza v usloviyah nepolnoj informacii optiko-teplovogo i elektricheskogo nerazrushayushchego kontrolya dlya prognozirovaniya predel'nogo resursa ekspluatatsii konstrukcij iz kompozitnykh materialov* [Application of deep neural networks based on palliative analysis under conditions of incomplete information of optical thermal and electric nondestructive testing for prediction of the limit resource of operation of construction] // Testing. Diagnostics, 2021, vol. 24, no. 3 (273), pp. 4–15. doi: 10.14489/td.2021.03.pp.004-015. (In Russian)
- [5] Zhelezina G. F., Sivakov D. V., Gulyaev I. N. *Vstroennyj kontrol': ot datchikov do informkompozitov* [Built-in control: from sensors to information composites] // Aviation Industry, 2008, no. 3, pp. 46–50. (In Russian)
- [6] Khabarov S. S., Komshin A. S. *Primenenie volokonno-opticheskoy izmeritel'noj tekhnologii i fazohronometricheskogo metoda dlya kontrolya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya konstrukcij letatel'nykh apparatov* [Application of fiber-optic measuring technology and phase-chronometric method for control and monitoring of technical condition of aircraft structures] // Measurement Techniques, 2021, no. 2, pp. 49–56. doi: 10.32446/0368-1025it.2021-2-49-56. (In Russian)
- [7] Aniskovich V. A., Budadin O. N., Zaikina N. L., Kutyurin V. Yu., Mukhanova T. A., Razin A. F., Solovei A. V., Vodopyanov V. A. *Izmerenie deformacij s ispol'zovaniem volokonno-opticheskikh datchikov v processe prochnostnykh ispytaniy anizogridnykh konstrukcij iz kompozicionnykh materialov* [Measurement of strains using fiber-optic sensors during strength testing of anisogrid composite structures] // Testing. Diagnostics, 2018, no. 7, pp. 44–49. doi: 10.14489/td.2018.07.pp.044-049. (In Russian)
- [8] Svirskiy Yu. A., Trunin Yu. P., Pankov A. V., Zaytsev M. D., Fagalov V. F. *Bortovye sistemy monitoringa (BSM) i perspektivy primeneniya v nih volokonno-opticheskikh datchikov* [Health monitoring systems (HMS) and perspectives to use fiber bragg strain gages in HMS] // Composites and nanostructures, 2017, vol. 9, no. 1 (33), pp. 35–44. (In Russian)
- [9] Bautin A. A., Svirsky Yu. A., Pankov A. V., Voronkov R. V. *Sposoby primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov deformacij v sistemah monitoringa* [Methods of using fiber Bragg grating strain sensors in monitoring systems] // Applied photonics, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 391–407. doi: 10.15593/2411-4367/2018.4.07. (In Russian)

- [10] Kinet D., Megret P., Goossen K. W., Liang Q., Heider D., Caucheteur Ch. Fiber bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions // *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 7394–7419. doi: 10.3390/s140407394.
- [11] Bado M. F., Casas J. R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring // *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 5. doi: 10.3390/s21051818.
- [12] Frazao O., Melo M., Marques P. V. S., Santos J. L. Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain–temperature discrimination // *Measurement Science and Technology*, 2005, vol. 16, no. 4, pp. 984–988. doi: 10.1088/0957-0233/16/4/010.
- [13] Chehura E., James S. W., Tatam R. P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating // *Optics Communications*, 2007, vol. 275, issue 2, pp. 344–347. doi: 10.1016/J.OPTCOM.2007.03.043.
- [14] Guan B. O., Tam H. Y., Tao X. M., Dong X. Y. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating // *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 6, pp. 675–677.
- [15] Demirel M., Robert L., Molimard J., Vautrin A., Orteu J.-J. Strain and Temperature Discrimination and Measurement Using Superimposed Fiber Bragg Grating Sensor // *Proceedings of the international conference «Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures»*, 2007, pp. 639–640. doi: 10.1007/978-1-4020-6239-1_317.
- [16] Wu C., Zhang Y., Guan B.-O. Simultaneous measurement of temperature and hydrostatic pressure using Bragg gratings in standard and grapefruit microstructured fibers // *IEEE Sensors Journal*, 2011, vol. 11, no. 2. pp. 489–492. doi: 10.1109/JSEN.2010.2068045.
- [17] Sivanesan P., Sirkis J. S., Murata Yo., Buckley S. G. Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneously measuring strain and temperature // *Optical Engineering*, 2002, vol. 41, no. 10, pp. 2456–2463. doi: 10.1364/AO.47.001668.
- [18] Kogelnik H. Theory of optical-waveguides in guided wave optoelectronics; Part of the Springer Series in Electronics and Photonics book series (SSEP). Springer-Verlag, Berlin, 1988, vol. 26, pp. 7–88.
- [19] Fedotov M. Yu., Budadin O. N., Kozel'skaya S. O. *Matematicheskoe modelirovanie i eksperimental'nye rezul'taty kontrolya PKM volokonno-opticheskimi datchikami s uchetom vozdeystviya faktorov, imitiruyushchih real'nye usloviya ekspluatatsii* [Mathematical modeling and experimental results of control of pcm by fiber-optic sensors taking into account the influence of factors simulating real operating conditions] // *Testing. Diagnostics*, 2019, no. 4, pp. 12–19. doi: 10.14489/td.2019.04.pp.012-019. (In Russian)
- [20] Fedotov M. Yu., Goncharov V. A., Shienok A. M., Sorokin K. V. *Issledovanie izgibnyh deformacij ugleplastika optovolonnyimi sensorami na breggovskih reshetkah* [Investigation of bending deformations of carbon fiber with fiber-optic sensors on Bragg gratings] // *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 2 (74), pp. 139–147. (In Russian)
- [21] Kalli K., Simpson A. G., Zhou K., Zhang L., Bennion I. Tailoring the temperature and strain coefficients of Type I and Type IA dual grating sensors – the impact of hydrogenation conditions // *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17, no. 5, P. 949. doi: 10.1088/0957-0233/17/5/S02.
- [22] Haran F. M., Rew J. K., Foote P. D. A Fiber Bragg grating strain gauge rosette with temperature compensation // *Proceedings of the SPIE*, 1998, vol. 3330, pp. 220–230. doi: 10.1117/12.316977.
- [23] Budadin O., Vavilov V., Fedotov M., Vasiliev S., Gnusin P., Kozelskaya S., Kuimova M. Theoretical and Experimental Studies of Structural Health Monitoring of Carbon Composites with Integrated Optical Fiber Sensors Based on Fiber Bragg Gratings // *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, vol. 40, no. 4. doi: 10.1007/s10921-021-00822-5.
- [24] Shishkin V. V., Terentyev V. S., Kharenko D. S., Dostovalov A. V., Wolf A. A., Simonov V. A., Fedotov M. Yu., Shienok A. M., Shelemba I. S., Babin S. A. Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // *Journal of Sensors*, 2016, vol. 2016. doi: 10.1155/2016/3230968.

Сведения об авторе

Федотов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, главный конструктор проекта, действительный член Российской инженерной академии, Международной инженерной академии, Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике. Место работы: Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана в 2009 году. Область научных интересов: волоконно-оптические системы контроля напряженно-деформированного состояния и диагностики конструкций авиационно-космической техники из полимерных композитных материалов.

ORCID: 0000-0002-2571-7767