

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

© 2023 г. М.Ю. Федотов^{1, 2,*}

¹Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия 630090 Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 1

²Российская инженерная академия, Россия 125009 Москва, Газетный пер., 9, стр. 4
E-mail: *fedotovmyu@gmail.com

Поступила в редакцию 25.07.2023; после доработки 01.09.2023
Принята к публикации 04.09.2023

Рассмотрены преимущества и недостатки существующих методов термокомпенсации данных от волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток в составе встроенной системы одновременного контроля деформации и температуры полимерных композитных материалов. Показано, что при невозможности внешнего контроля температуры наиболее целесообразно реализация метода двух оптических волокон, обладающих различной чувствительностью хотя бы к одному из этих параметров за счет различных легирующих добавок. Рассмотрены технологические вопросы, связанные с формированием пространственной топологии и обеспечением эффективного опроса встроенной оптической системы контроля полимерных композитных материалов методом двух волокон. Приведены результаты теоретических исследований линейной модели термокомпенсации, модели, учитывающей влияние перекрестной чувствительности, а также квадратичной модели термокомпенсации данных оптического контроля. Установлено, что линейная модель является наиболее простой, однако при ее применении стоит учитывать погрешность, связанную с неточностью аппроксимации данных оптического контроля линейной функцией. При этом показано, что для повышения качества и достоверности результатов оптического контроля целесообразно применять квадратичную модель термокомпенсации, обеспечивающую уровень погрешности, сопоставимый с погрешностью устройства опроса волоконно-оптических датчиков. Полученные результаты могут быть применены для разработки методик одновременного контроля образцов, а также монолитных и трехслойных конструкций из конструкционных слоистых ПКМ с предельными условиями формования (температура не более 180 °С, удельное давление не более 0,7 МПа) как в процессе стендовых и иных испытаний, так и, в перспективе, в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: конструкционный слоистый полимерный композитный материал, оптический контроль, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, пространственная топология, линейная модель термокомпенсации, перекрестная чувствительность, квадратичная модель термокомпенсации, погрешность данных контроля.

THEORETICAL INVESTIGATIONS OF TEMPERATURE COMPENSATION OF THE RESULTS OF THE DIAGNOSIS OF POLYMER COMPOSITES BY THE METHOD OF TWO OPTICAL FIBER

© 2023 M. Yu. Fedotov^{1,2,*}

¹Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academician
Koptug ave. 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

²All-Russian public organization «Russian Academy of Engineering»,
Gazetny lane, 9, building 4, Moscow, 125009, Russia,

The paper considers the advantages and disadvantages of existing methods for temperature compensation of data from fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings as part of an embedded system for simultaneous testing of deformation and temperature of polymer composite materials. It is shown that when external temperature testing is impossible, it is most expedient to implement the method of two optical fibers with different sensitivity to at least one of these parameters due to different dopants. Technological issues related to the formation of a spatial topology and the provision of an effective interrogation of the embedded optical system for monitoring polymer composite materials by the two-fiber method are considered. The results of theoretical researches of a linear model of temperature compensation, a model that takes into account the influence of cross sensitivity, as well as a quadratic model of temperature compensation of optical testing data are presented. It has been established that the linear model is the simplest, however, when using it, one should take into account the error associated with the inaccuracy of the approximation of optical inspection data by a linear function. At the same time, it is shown that in order to improve the quality and reliability of the results of optical testing, it is advisable to use a quadratic model of

temperature compensation, which provides an error level comparable to the error of the fiber-optic sensor interrogator. The results obtained can be used to develop methods for the simultaneous testing of samples, as well as monolithic and three-layer structures from structural layered of polymer composite materials with limiting molding conditions (temperature not more than 180 °C, specific pressure not more than 0,7 MPa), as in the process of bench and other tests, and, in the future, in real operating conditions.

Keywords: structural layered polymeric composite material, optical testing, fiber optic sensor, fiber Bragg grating, spatial topology, linear temperature compensation model, cross sensitivity, quadratic temperature compensation model, testing data error.

DOI: 10.31857/S0130308223100056, **EDN:** WZWVND

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение слоистых полимерных композитных материалов (ПКМ) на основе углеродных армирующих волокон для высоконагруженных и ответственных конструкций летательных аппаратов (ЛА) [1] и других изделий ракетно-космической, транспортной, строительной отраслей, а также машиностроения, судостроения, энергетики требует новых подходов к оценке технического состояния таких конструкций для обеспечения их безопасной эксплуатации [2, 3]. В этой связи одним из наиболее перспективных направлений в области неразрушающего контроля (НК) и диагностики ПКМ и конструкций является применение метода оптического НК [4, 5], позволяющего с помощью интегрированных волоконно-оптических датчиков (ВОД) [6, 7] на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [8, 9] определять действующие значения деформаций и температур в режиме реального времени, а также информировать об их превышении непосредственно при эксплуатации. Однако, как правило, контролируемые объекты работают при одновременном воздействии как механических нагрузок, так и температур, что приводит к необходимости учета температурной поправки.

При этом целый ряд работ посвящен решению вопросов, связанных с термокомпенсацией данных от ВОД для различных конструкций. Так, в работе [10] рассмотрены некоторые аспекты термокомпенсации данных от волоконных световодов (ВС) с ВБР для применения в качестве системы контроля деформаций предварительно напряженных бетонных конструкций. Для этих целей исследовалась конструкция типа «Smart-Strand», представляющая собой трос, состоящий из шести стальных спиральных элементов диаметром 5 мм, при этом в качестве центральной жилы использовалась жила из углепластика диаметром 5,3 мм, в которую был интегрирован ВС с ВБР с ЗП диаметром 5,3 мм. Исследования по термокомпенсации данных от ВБР проводились на бетонных образцах в диапазоне температур от –15 до 55 °C. Для проведения контроля применялась известная линейная модель оптического контроля, приведены известные основные соотношения. В статье [11] предложена конструкция ВОД для одновременного измерения деформации и температуры для применения в системах контроля повреждений объектов морской, авиационно-космической отраслей и гражданского строительства, где не требуется высокая точность измерений. В частности, диапазон измеряемых температур составляет 50—180 °C, деформаций — 1100 мкм/м. В [12] рассмотрены практические аспекты применения ВОД на основе ВБР, имеющих различное конструктивное исполнение, для мониторинга состояния конструкций за счет установки на поверхность исследуемых объектов с помощью клеевого соединения. В работе [13] приведены основные расчетные соотношения и рассмотрен метод термокомпенсации с использованием поверхностно закрепляемых ВОД на основе ВБР для мониторинга металлических конструкций с различными КЛТР. Анализируя данные работы, стоит отметить, что в них практически отсутствует описание математических моделей оптического контроля композитных конструкций, при этом приводятся лишь финальные соотношения для линейного приближения.

Целью работы является разработка и адаптация к реальным условиям математических моделей термокомпенсации данных оптического одновременного контроля деформации и температуры ПКМ интегрированными ВОД на основе ВБР методом двух оптических волокон, теоретическая оценка погрешности результатов контроля с использованием разработанных моделей.

МЕТОДЫ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ДАННЫХ ВОД В СОСТАВЕ ПКМ

Термокомпенсация может быть эффективно реализована за счет использования специализированных волоконных компонентов, которые потенциально пригодны для интегрирования в ПКМ. Среди них суперструктурированные [14], наклонные [15], чирпованные [16] с обратным профилем показателя преломления, длиннопериодные ВБР, волоконные интерференционные схемы на основе

интерферометра Маха-Цандера, многомодовой интерференции, с использованием волокон с различным диаметром, микроструктурированные волокна [17], с использованием лазерного резонатора эрбиевого лазера, микро- и нановолокна, ВОД на основе поляризационно-зависимых потерь, с использованием двух ВБР, расположенных на большом спектральном расстоянии друг от друга. Все перечисленные выше способы имеют несколько существенных недостатков в плане практического использования и, в частности, при интегрировании в ПКМ, либо не соответствуют техническим требованиям коммерчески доступного оптического оборудования (ОУ). Во-первых, это наличие побочных максимумов в спектре отражения таких ВОД, что затрудняет расположение большого количества ВОД на основе ВБР на одном ВС и может значительно усложнить конструкцию оптической линии квазираспределенной системы ВОД в составе ПКМ. Второй существенный недостаток связан с хрупкостью конструкции самих ВОД, что обусловлено способом их изготовления и принципом функционирования. В-третьих, существует недостаток, который связан с очень большой областью спектра, требуемой для работы ВОД (до 300 нм). В-четвертых, для работы ВОД требуется ОУ с очень высоким спектральным разрешением, например, (1—5) пм, что на практике ниже спектрального разрешения коммерчески доступных ОУ. Каждый из этих недостатков, не дает практической возможности выполнения термокомпенсации ВОД в составе ПКМ и конструкций. Фактически, единственным методом, который на данный момент является физически реализуемым, технологичным и относительно простым, является метод двух волокон, в рамках которого существует возможность либо устранить полностью, либо значительно ослабить эти недостатки. Например, ВОД на основе однородных ВБР, сформированные в ВС, имеют узкий спектральный контур (до 1 нм) и незначительные побочные максимумы, что избавляет от первого недостатка. На данный момент существуют методы формирования/записи ВБР в ВС без снятия защитного покрытия (ЗП) — поточечная фемтосекундная запись, таким образом можно избежать второго недостатка, связанного с хрупкостью конструкции ВОД при интегрировании его в ПКМ. Третий недостаток отсутствует, так как в сравнительно небольшом спектральном интервале 70 нм может быть размещено до нескольких десятков ВОД, записанных в одном ВС для создания квазираспределенной системы ВОД. Коммерчески доступные ОУ с разрешением около 10 пм пригодны для оптического НК этим методом, таким образом устраняется и четвертый недостаток.

Стоит подчеркнуть, что метод двух волокон применим, когда нет возможности использовать дополнительный ВОД, измеряющий независимо либо температуру, либо деформацию. Если же есть возможность использовать, например, внешний измеритель температуры, то достаточно только одного ВС с ВОД для определения деформации ПКМ и конструкций.

Таким образом, предложен новый метод одновременного контроля деформации и температуры конструкций из слоистых углепластиков, имеющих различную схему армирования, с помощью интегрированных в структуру материала на этапе сборки пакета препрега (для автоклавного формования) либо слоев армирующего наполнителя (для формования методом вакуумной инфузии) точечных ВОД на основе ВБР, имеющих различную деформационную и/или температурную чувствительность. Подход, в целом, известен в линейной постановке, однако информация довольно разрозненная. При этом для контроля композитных конструкций с использованием квадратичной модели оптического контроля, учитывающей дополнительно перекрестную чувствительность, такой подход до сих пор не применялся.

В данной работе приведено обобщение моделей термокомпенсации данных от ВОД на основе ВБР в составе ПКМ для случаев:

- линейного приближения;
- приближения, учитывающего перекрестную чувствительность;
- квадратичного приближения.

Для все описанных моделей приведена оценка влияния погрешности определения измеряемых параметров — деформации и температуры.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПКМ МЕТОДОМ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Формирование пространственной топологии и выбор метода опроса ВОД

Говоря о реализации процесса термокомпенсации данных оптического НК от квазираспределенных ВОД на основе ВБР методом двух волокон, стоит отметить, что существенным фактором, напрямую влияющим на качество и достоверность данных контроля такой системы, является реализация пространственной топологии ВОД в составе ПКМ.

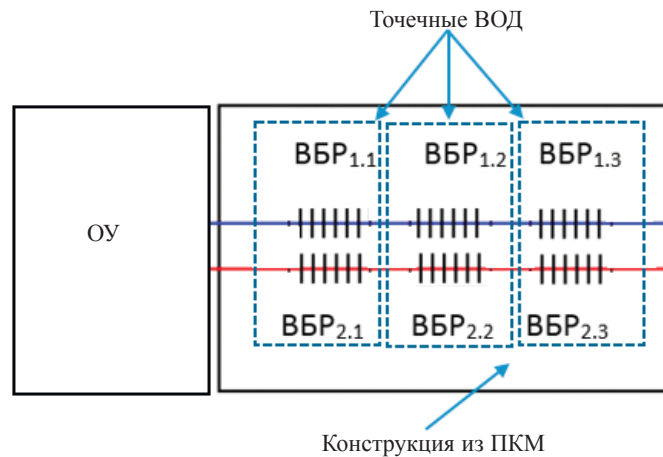


Рис. 1. Последовательная пространственная топология ВОД.

На основании результатов экспериментальных исследований [18], где была предложена и обоснована последовательная топология точечных ВОД на основе ВБР в составе квазираспределенной системы (рис. 1), в качестве метода опроса с учетом особенностей коммерчески доступных ОУ был выбран метод спектрального разделения каналов (СРК) [19] (рис. 2).

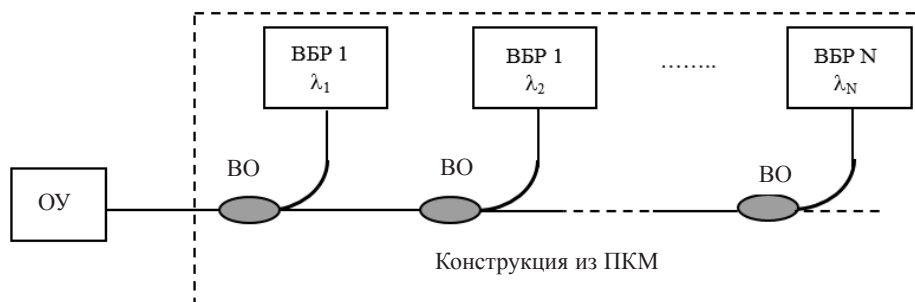


Рис. 2. Метод СРК для опроса ВОД: ВО — волоконный ответвитель.

Линейная модель термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ с помощью ВОД на основе ВБР

Основы термокомпенсации методом двух волокон были рассмотрены в [20]. Так, метод основан на решении системы уравнений, составленной на базе измеренных при калибровке параметров для близко расположенных двух ВБР, сформированных на ВС, обладающих существенно различной чувствительностью к деформации и температуре, либо к одному из этих параметров за счет различных легирующих добавок, например, Ge, P, Sb и др. [21]. Данный метод (линейная модель) применим в предположении о неизменности параметров чувствительностей при различных температурах и деформациях, т.е. в пренебрежении перекрестных чувствительностей, характеризующих влияние температуры на чувствительность к деформации и наоборот. Тогда справедлива система уравнений вида:

$$\begin{cases} b_1 = K_{T1}T + K_{\varepsilon1}\varepsilon \\ b_2 = K_{T2}T + K_{\varepsilon2}\varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

где $b_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{01}}$, $b_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{02}}$ — относительные смещения резонансных длин волн ВБР λ_{01} , λ_{02} , нм вследствие изменения относительной деформации ε , мкм/м и/или температуры T , °C; $\Delta\lambda_1$,

$\Delta\lambda_2$ — абсолютные смещения резонансных длин волн ВБР $\lambda_{01}, \lambda_{02}$, нм; K_{T1}, K_{T2} — линейные коэффициенты чувствительности ВБР к температуре для разнотемпературных ВС, $(^\circ\text{C})^{-1}$; $K_{\varepsilon1}, K_{\varepsilon2}$ — линейные коэффициенты чувствительности ВБР к деформации для разнотемпературных ВС, $(\text{мкм/м})^{-1}$.

Решение (1) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} T = \frac{b_1 K_{\varepsilon2} - b_2 K_{\varepsilon1}}{K_{\varepsilon2} K_{T1} - K_{\varepsilon1} K_{T2}} \\ \varepsilon = \frac{b_1 - K_{T1} T}{K_{\varepsilon1}} = \frac{b_2 K_{T1} - b_1 K_{T2}}{K_{\varepsilon2} K_{T1} - K_{\varepsilon1} K_{T2}} \end{cases} \quad (2)$$

Как следует из (2), для определения температуры и деформации надо измерить следующие параметры ВБР: $K_{T1}, K_{T2}, K_{\varepsilon1}, K_{\varepsilon2}$, а также b_1, b_2 .

Для определения параметров применяется аппроксимация функции двух переменных $b(T, \varepsilon)$ по методу наименьших квадратов (МНК) двумерным линейным полиномом, т.е. необходимо проведение измерений при различных температурах и деформациях зависимостей смещения резонансной длины волны ВБР, что сводится к измерению смещения длины волны на сетке значений:

$$b_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, N_{ij} \quad (3)$$

и определению по этой сетке всех коэффициентов по МНК. Здесь b_{ij} — экспериментально измеренные значения при наборе температур $\{T_1, T_2, \dots, T_{N_i}\}$ и деформаций $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{N_j}\}$. Заметим, что наборы температур и деформаций могут содержать члены неупорядоченные по их величине, так как это не имеет значения для метода МНК. Иными словами, изменение температур или деформаций, для определения соответствующих им b_{ij} , могут проводиться в любом направлении, либо даже выбираться хаотически. Для нахождения коэффициентов надо решить линейную систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов K_T, K_ε :

$$\begin{cases} K_T N_j \sum_{i=1}^{N_i} T_i^2 + K_\varepsilon \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i b_{i,j} \\ K_T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j + K_\varepsilon N_i \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j b_{i,j} \end{cases} \quad (4)$$

Решение (4) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \overline{K_T} = \frac{c_2 d_1 - c_3 d_2}{c_1 c_2 - c_3^2} \\ \overline{K_\varepsilon} = \frac{-c_3 d_1 + c_1 d_2}{c_1 c_2 - c_3^2} \end{cases} \quad (5)$$

где соответствующие коэффициенты определяются выражениями:

$$\begin{aligned} c_1 &= N_j \sum_{i=1}^{N_i} T_i^2, & c_2 &= N_i \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j^2, & c_3 &= \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j^2, \\ d_1 &= \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} b_{i,j} T_i, & d_2 &= \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j b_{i,j}. \end{aligned} \quad (6)$$

Стоит отметить, что для определения параметров в (1) можно также воспользоваться стандартными процедурами аппроксимации МНК из пакетов MATLAB (fit) или Python (scipy.optimize.leastsq) [22]. Конечно, эти процедуры работают значительно медленнее выражений (4—6), однако поскольку процесс калибровки выполняется однократно, то данный недостаток является несущественным. К достоинствам использования стандартных методов можно отнести их существенно более легкое использование на более сложных аппроксимационных полиномах, когда число перекрестных слагаемых значительно возрастает, что хорошо видно из выражения вида:

$$b(T, \varepsilon) = B(T, \varepsilon) - B(0, 0) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^{N-n} K_{n,k} \varepsilon^k T^n + O(T + \varepsilon)^{N+1}, \quad (7)$$

где $K_{n,k} = B^{(n,k)}(0,0)/k!n!$; $B^{(n,k)}$ — частные производные функции $B(T, \varepsilon)$ в точке $(0,0)$, эквивалентные коэффициентам чувствительности K ; $O(T + \varepsilon)^{N+1}$ — остаточный член при разложении функции $B(T, \varepsilon)$ в ряд Тейлора до $N+1$ порядка малости.

В качестве примера приведем поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации по описанной линейной модели термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ и конструкций интегрированными ВБР (рис. 3).

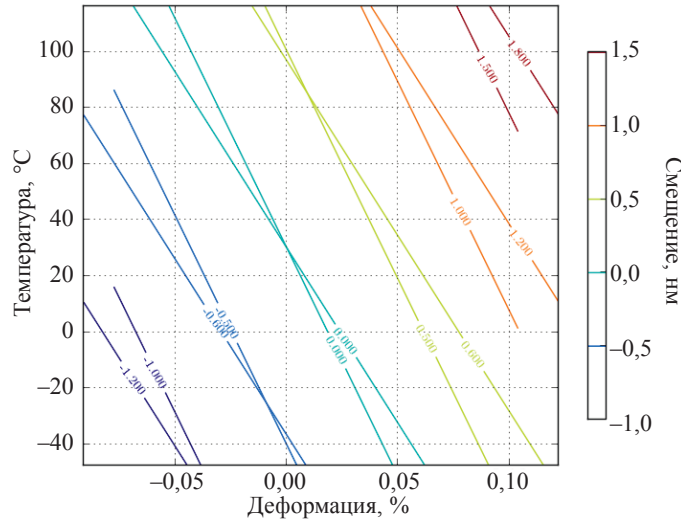


Рис. 3. Поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации в линейном приближении.

Здесь линиям с различным наклоном соответствуют ВБР, записанные в ВС с различным легированием. Соответствующее смещение резонансных длин волн ВБР подписано вдоль каждой линии.

Обращаясь к теории ошибок [23], а также к результатам теоретических исследований по оценке погрешностей встроенной в ПКМ волоконно-оптической системы контроля на основе ВОД [24], оценим погрешность определения деформации и температуры с использованием линейной модели термокомпенсации:

$$\begin{cases} \delta T = \pm \frac{\left(\overline{K}_{\varepsilon 2}^2 \delta b_1^2 + \overline{K}_{\varepsilon 1}^2 \delta b_2^2 \right)^{1/2}}{\overline{K}_{\varepsilon 2} \overline{K}_{T1} - \overline{K}_{\varepsilon 1} \overline{K}_{T2}} \\ \delta \varepsilon = \pm \frac{\left(\overline{K}_{T2}^2 \delta b_1^2 + \overline{K}_{T1}^2 \delta b_2^2 \right)^{1/2}}{\overline{K}_{\varepsilon 2} \overline{K}_{T1} - \overline{K}_{\varepsilon 1} \overline{K}_{T2}} \end{cases} \quad (8)$$

где $\delta b_{1,2}$ означает абсолютную погрешность определения относительных смещений резонансных длин волн ВБР; верхнее подчеркивание соответствующих коэффициентов чувствительности означает, что используются их средневзвешенные величины, при этом $\delta b_{1,2}$ определяется выражением:

$$\delta b_{1,2} = \left(\delta b_{\text{МНК}1,2}^2 + \delta b_{\text{ПР}1,2}^2 \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где $\delta b_{\text{ПР}1,2}$ — погрешность ОУ, которая может быть выбрана одинаковой для обеих ВБР, $\delta b_{\text{МНК}1,2}$ находится из эксперимента методом МНК как среднее квадратическое отклонение (СКО) относительного смещения резонансной длины волны ВБР, т.е. оценочные погрешности при калибровке каждой из двух ВБР определяются по формуле:

$$\delta b_{\text{МНК}1,2} = \left[\frac{1}{N_i N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \left(b_{i,j} - b(\overline{K}_T, \overline{K}_\varepsilon, T_i, \varepsilon_j) \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Модель термокомпенсации, учитывающая перекрестную чувствительность ВОД на основе ВБР в составе оптической системы контроля ПКМ

Если при изменении температуры и/или деформации соответствующие коэффициенты чувствительности к деформации и/или температуре будут значительно изменяться, то для уменьшения общей погрешности и повышения достоверности данных оптического контроля ПКМ и конструкций необходимо учитывать перекрестные коэффициенты чувствительности ВБР для обоих ВС, реализующих возможность термокомпенсации по методу двух волокон. В этом случае система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} b_1 = K_{T1}T + K_{\varepsilon1}\varepsilon + K_{C1}T\varepsilon \\ b_2 = K_{T2}T + K_{\varepsilon2}\varepsilon + K_{C2}T\varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

В итоге, решение (11) сводится к определению корней квадратного уравнения относительно ε и T . При этом целесообразно остановиться на одном физически обоснованном решении:

$$\begin{cases} T = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_0c_2}}{2c_2} \\ \varepsilon = \frac{b_1 - K_{T1}T}{K_{\varepsilon1} + K_{C1}T} \end{cases}, \quad (12)$$

где соответствующие коэффициенты определяются выражениями:

$$\begin{aligned} c_0 &= b_1K_{\varepsilon2} - b_2K_{\varepsilon1}, \\ c_1 &= (K_{\varepsilon1}K_{T2} - K_{\varepsilon2}K_{T1}) + (b_1K_{C2} - b_2K_{C1}), \\ c_2 &= K_{T2}K_{C1} - K_{T1}K_{C2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Нетрудно проверить, что (12) с учетом (13) переходят в (2) при $K_{C1,2} \rightarrow 0$. Таким образом, для реализации системы оптического контроля ПКМ и конструкций этим способом нужно знать большее количество параметров: помимо K_{T1} , K_{T2} , $K_{\varepsilon1}$, $K_{\varepsilon2}$, b_1 , b_2 нужно еще определять K_{C1} , K_{C2} .

Вопрос определения искомых параметров также сводится к применению аппроксимации с помощью МНК функции двух переменных $b(T, \varepsilon)$ (11) двумерным полиномом, т.е. к проведению оптического контроля ПКМ и конструкций путем определения зависимостей смещения резонансной длины волны ВБР при различных температурах и деформациях, что сводится, фактически, к измерению смещения резонансной длины волны ВБР на сетке значений (3) и определению по этой сетке всех коэффициентов чувствительности методом МНК. Для нахождения значений коэффициентов чувствительности нужно решить линейную систему уравнений вида:

$$\begin{cases} K_T N_j \sum_{i=1}^{N_i} T_i^2 + K_\varepsilon \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j + K_C \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i b_{i,j} \\ K_T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j + K_\varepsilon N_i \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j^2 + K_C \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j b_{i,j} \\ K_T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j + K_\varepsilon \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j^2 + K_C \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j b_{i,j} \end{cases} \quad (14)$$

Решение системы уравнений (14) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \overline{K}_T = \frac{c_2c_3d_1 - c_6^2d_1 - c_3c_4d_2 + c_5c_6d_2 - c_2c_5d_3 + c_4c_6d_3}{D} \\ \overline{K}_\varepsilon = \frac{-c_3c_4d_1 + c_5c_6d_1 + c_1c_3d_2 - c_5^2d_2 + c_4c_5d_3 - c_1c_6d_3}{D} \\ \overline{K}_C = \frac{-c_2c_5d_1 + c_4c_6d_1 + c_4c_5d_2 - c_1c_6d_2 + c_1c_2d_3 - c_4^2d_3}{D} \end{cases}, \quad (15)$$

где дискриминант D и соответствующие коэффициенты определяются как

$$D = c_1 c_2 c_3 - c_3 c_4^2 - c_2 c_5^2 + 2c_4 c_5 c_6 - c_1 c_6^2. \quad (16)$$

В качестве примера приведем поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации по описанной модели термокомпенсации, учитывающей перекрестную чувствительность данных оптического контроля ПКМ и конструкций ВОД на основе ВБР (рис. 4).

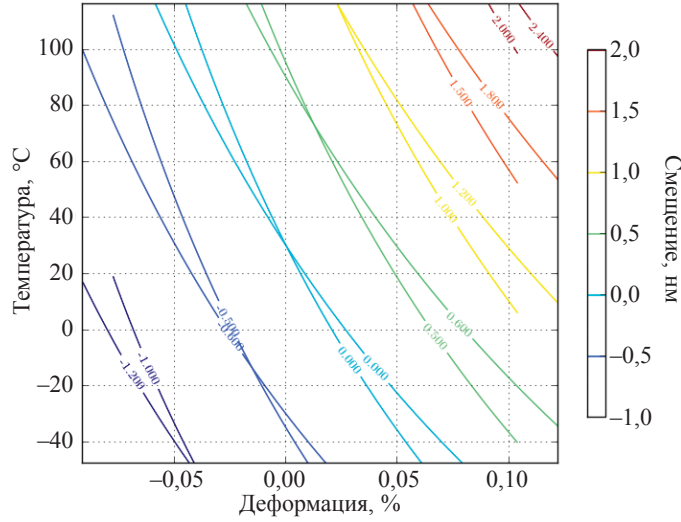


Рис. 4. Поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации с учетом перекрестной чувствительности.

Из рис. 4 видно, что появление перекрестного слагаемого привело к существенной изогнутости изолиний. Однако, благодаря отличающимся наклонам кривых во всей области параметров, метод термокомпенсации, основанный на использовании двух различных волокон, остается применимым и в этом случае.

По аналогии с линейной моделью оценим погрешность определения деформации и температуры с использованием модели термокомпенсации, учитывающей перекрестную чувствительность:

$$\begin{cases} \delta T = \pm [T_{b_1}'^2 \delta b_1^2 + T_{b_2}'^2 \delta b_2^2] \\ \delta \varepsilon = \pm \left[\left(\frac{1}{TK_{C1} + K_{\varepsilon 1}} + \frac{(-b_1 K_{C1} - K_{T1} K_{\varepsilon 1}) T_{b_1}'}{(TK_{C1} + K_{\varepsilon 1})^2} \right)^2 \delta b_1^2 + \frac{(-b_1 K_{C1} + K_{T1} K_{\varepsilon 1})^2 T_{b_2}'^2}{(TK_{C1} + K_{\varepsilon 1})^4} \delta b_2^2 \right]^{1/2}, \end{cases} \quad (17)$$

где $\delta b_{1,2}$ определяется выражением (9) с учетом (10), а $T_{b_{1,2}}'$ — частные производные температуры T по параметрам $b_{1,2}$:

$$\begin{cases} T_{b_1}' = \frac{1}{2c_2} \left(-K_{C2} + \frac{2c_1 K_{C2} - 4c_2 K_{\varepsilon 2}}{2\sqrt{c_1^2 - 4c_0 c_2}} \right) \\ T_{b_2}' = \frac{1}{2c_2} \left(K_{C1} + \frac{-2c_1 K_{C1} + 4c_2 K_{\varepsilon 1}}{2\sqrt{c_1^2 - 4c_0 c_2}} \right), \end{cases} \quad (18)$$

где T и коэффициенты c_0, c_1, c_2 определяются формулой (13).

Формулы (17) имеют достаточно сложный вид и при повышении степени полинома они усложняются еще больше, это нужно учитывать при построении эффективной системы одновременного оптического контроля деформации и температуры ПКМ и конструкций.

Квадратичная модель термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ с помощью ВОД на основе ВБР

Как следует из [24], температурные и деформационные зависимости гораздо точнее могут быть описаны квадратичной зависимостью, нежели линейной, поэтому оправдано рассмотрение квадратичного полинома аппроксимации для описания двумерного поведения смещения резонансной длины волны ВБР в составе ПКМ.

Система уравнений (11), учитывающая перекрестные коэффициенты чувствительности, является неполной в смысле разложения двумерной функции до второго порядка малости аргументов. Из формулы (7) следует, что для учета всех членов второго порядка малости надо решать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} b_1 = K_{1T1}T + K_{1\epsilon1}\epsilon + K_{C1}T\epsilon + K_{2T1}T^2 + K_{2\epsilon1}\epsilon^2 \\ b_2 = K_{1T2}T + K_{1\epsilon2}\epsilon + K_{C2}T\epsilon + K_{2T2}T^2 + K_{2\epsilon2}\epsilon^2 \end{cases} \quad (19)$$

Аналитическое решение (19) имеет очень сложный вид, поэтому наиболее целесообразно обратиться к численным методам.

Определение параметров K_{1T} , $K_{1\epsilon}$, K_C , K_{2T} , $K_{2\epsilon}$ по аналогии с рассмотренными выше моделями термокомпенсации, сводится к применению аппроксимации двумерным полиномом функции двух переменных $b(T, \epsilon)$ из (19) с помощью МНК, т.е. к проведению оптического контроля ПКМ и конструкций путем определения зависимостей смещения резонансной длины волны ВБР при различных температурах и деформациях, действующих одновременно, что аналогично сводится к определению по сетке (3) всех значений коэффициентов чувствительности методом МНК. Так, для нахождения соответствующих коэффициентов надо решить линейную систему уравнений пятого порядка:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \epsilon_j (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \epsilon_j (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \epsilon_j^2 (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Решение системы уравнений (20) является довольно сложным и громоздким, поэтому приводить его в символьном виде не будем, его можно найти, используя стандартные методы численного поиска решения систем уравнений, например, на языке Python функция `numpy.linalg.solve` [22].

В качестве примера приведем поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации по описанной квадратичной модели термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ и конструкций ВОД на основе ВБР, учитывающей все члены второго порядка разложения (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что взаимный наклон линий не является постоянным, что может сказаться на точности термокомпенсации. При анализе результатов калибровки реального образца из ПКМ этот момент должен быть учтен.

Оценим погрешность определения деформации и температуры с использованием квадратичной модели термокомпенсации:

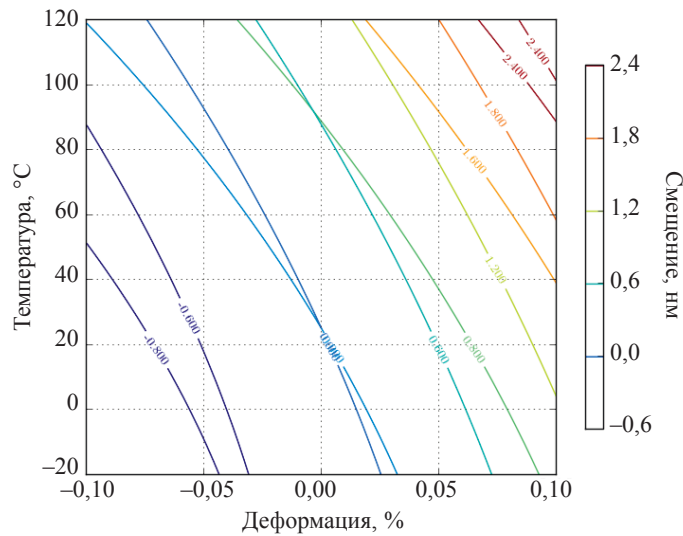


Рис. 5. Поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации с учетом квадратичной модели термокомпенсации.

$$\begin{cases} \delta T = \pm \frac{\left[\left(\bar{K}_{1\epsilon 2} + \bar{K}_{C2}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 2}\epsilon \right)^2 \delta b_1^2 + \left(\bar{K}_{1\epsilon 1} + \bar{K}_{C1}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 1}\epsilon \right)^2 \delta b_2^2 \right]^{1/2}}{I} \\ \delta \epsilon = \pm \frac{\left[\left(\bar{K}_{1T2} + \bar{K}_{C2}\epsilon + 2\bar{K}_{2T2}T \right)^2 \delta b_1^2 + \left(\bar{K}_{1T1} + \bar{K}_{C1}\epsilon + 2\bar{K}_{2T1}T \right)^2 \delta b_2^2 \right]^{1/2}}{I} \end{cases} \quad (21)$$

где параметр I определяется выражением:

$$I = \left(\bar{K}_{1T1} + \bar{K}_{C1}\epsilon + 2\bar{K}_{2T1}T \right) \left(\bar{K}_{1\epsilon 2} + \bar{K}_{C2}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 2}\epsilon \right) - \left(\bar{K}_{1T2} + \bar{K}_{C2}\epsilon + 2\bar{K}_{2T2}T \right) \left(\bar{K}_{1\epsilon 1} + \bar{K}_{C1}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 1}\epsilon \right). \quad (22)$$

Из (21) с учетом (22) видно, что погрешность зависит от величины деформации и температуры. В случае, если $\bar{K}_{C1,2} = \bar{K}_{2\epsilon 1,2} = \bar{K}_{2T1,2} = 0$ выражение (21) сводится к (8).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДА ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ВЕЛИЧИНУ ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПКМ

Очевидно, что на результирующую точность определения деформации ПКМ и конструкций методом оптического контроля с использованием интегрированных ВОД на основе ВБР влияют два фактора. Первое, это погрешность определения резонансных длин волн ВБР, которая определяется параметрами используемого ОУ. Влияние этой погрешности было подробно исследовано ранее [20]. Второе, это погрешность калибровки, в которую входят как неточности при аппроксимации полученного массива данных методом МНК (вызванные отклонением реальных зависимостей от используемых для аппроксимации), так и погрешности определения соответствующих параметров во время процедуры калибровки. Для получения системы, отвечающей заданным параметрам и имеющей максимальную производительность, погрешность, вносимая ОУ, и погрешность калибровки должны быть одного порядка.

Оценка влияния неточности аппроксимации в линейном приближении

Для исследования влияния различных вкладов погрешности калибровки на результирующую величину измеряемой деформации рассмотрим поле смещений резонансной длины волны на двух модельных ВБР, описываемых общей формулой (7) с учетом второго порядка разложения, построенное в следующих диапазонах: температура — от -70 до 120 °C, относительная деформация от

Таблица 1

Коэффициенты чувствительностей ВБР для второго порядка разложения

№ ВБР	λ_0 , нм	K_T , пм/°C	K_ε , пм/(мкм/м)	K_C , пм/(°C·мкм/м)	K_{2T} , пм/°C ²	$K_{2\varepsilon}$, пм/(мкм/м) ²
ВБР1	1550,0	9,0	1,11	0,0002	0,01	0,00002
ВБР2	1550,0	13,0	1,11	0,0002	0,01	0,00002

–2000 до 2000 мкм/м (от –0,2 до 0,2 %). Коэффициенты, выбранные для расчета смещений, приведены в табл. 1.

Далее проведем оценку погрешности оптического контроля ПКМ и конструкций с помощью интегрированных ВОД на основе ВБР, возникающей в результате неточности аппроксимации, а также в процессе калибровки.

Очевидно, что линейная аппроксимация для метода двух волокон является наиболее предпочтительной ввиду простоты вычисления деформации и термокомпенсации. Вычисление погрешности определяемой относительной деформации проведем согласно (8). Значение $\delta b_{1,2}$ погрешности ОУ примем равным 10 пм для обеих ВБР (справедливо, например, для универсального регистрирующего модуля (УРМ) на основе спектрометра Ibsen I-MON 512 E) при резонансной длине волны ВБР $\lambda_0 = 1550$ нм.

Для рассматриваемого массива данных с учетом формул (9) и (10) получим значение абсолютной погрешности определения относительного смещения резонансных длин волн ВБР $\delta b_{1,2} = 73$ пм ($\delta b_{\text{МК1,2}} = 72$ пм). Подставляя полученное значение $\delta b_{1,2}$ в (8), с учетом оптических свойств выбранной пары ВС с ВБР, получим, что неточность аппроксимации в линейном приближении приводит к погрешности определения относительной деформации ПКМ и конструкций ± 260 мкм/м, что с учетом выбранных диапазонов изменения деформации и температуры составляет 13,0 %.

Оценка влияния погрешности определения параметров калибровки в линейном приближении

В предыдущем подразделе показано, что в линейном приближении неточность аппроксимации дает существенную погрешность определения резонансной длины волны ВБР ± 260 мкм/м. Эта цифра получена в предположении, что температура и деформация в процессе калибровки были определены точно. Сделаем случайную добавку в $\pm 0,2$ °C для температуры и $\pm 0,005$ % для деформации. Проведя аналогичную процедуру, получим, что абсолютная погрешность определения относительного смещения резонансных длин волн ВБР составила $\delta b_{1,2} = 75$ пм ($\delta b_{\text{МК1,2}} = 74$ пм), что в пересчете на погрешность определения относительной деформации ПКМ и конструкций составляет ± 267 мкм/м или 13,4 % с учетом диапазонов изменения деформации и температуры. Это означает, что вклад погрешности, вносимой при калибровке, на порядок меньше погрешности, возникающей вследствие неточности линейного приближения.

Оценка влияния погрешности определения параметров калибровки с учетом квадратичной модели термокомпенсации

Проведем аналогичную оценку с учетом применения квадратичной модели термокомпенсации в указанных диапазонах изменения деформации и температуры с аналогичными случайными добавками $\pm 0,2$ °C по температуре и $\pm 0,005$ % по деформации. Абсолютная погрешность определения относительного смещения резонансных длин волн ВБР в этом случае составила $\delta b_{1,2} \approx 16$ пм ($\delta b_{\text{МК1,2}} = 16$ пм), что сопоставимо с погрешностью ОУ.

На рис. 6 приведем зависимости погрешности определения параметров калибровки при одновременном изменении температуры и деформации, полученное по квадратичной модели термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ и конструкций с помощью формул (21), (22).

Анализируя полученные результаты, стоит отметить, что в случае учета второго порядка малости величина погрешности определения деформации становится зависимой от абсолютных значений температуры и деформации, а вид зависимости определяется вкладом нелинейных коэффициентов.

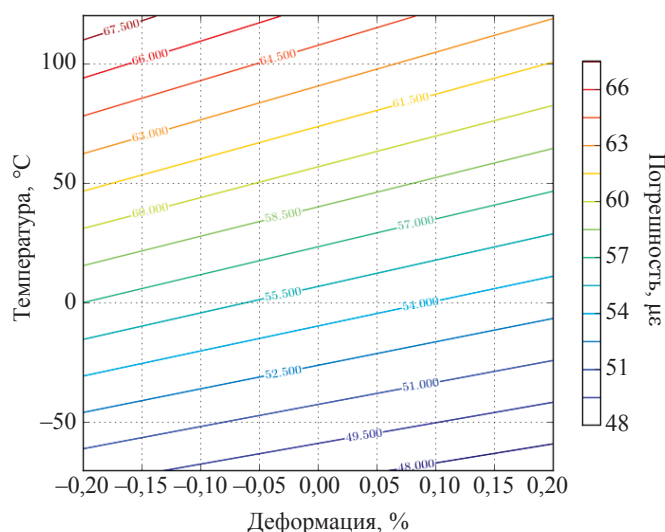


Рис. 6. Погрешность определения деформации ПКМ и конструкций по методу двух волокон с учетом квадратичной модели термокомпенсации.

ВЫВОДЫ

По результатам теоретических исследований установлено, что для одновременного контроля деформации и температуры конструкционных слоистых ПКМ, а также монолитных и трехслойных конструкций, изготавливаемых методами автоклавного и безавтоклавного формования при температурах не более 180 °С и удельных давлениях до 0,7 МПа (для монолитных конструкций) либо до 0,2 МПа (для трехслойных конструкций), интегрированными ВОД на основе ВБР, может эффективно применяться метод двух оптических волокон, который, с одной стороны, является относительно простым и технологичным, с другой стороны, имеет свои особенности с точки зрения обработки и интерпретации данных контроля. Описаны линейные, в том числе с учетом перекрестной чувствительности ВБР, и квадратичная модели термокомпенсации. Установлено, что применение квадратичной модели термокомпенсации позволяет снизить погрешность данных одновременного оптического контроля деформации на порядок в сравнении с линейной моделью термокомпенсации и получить результаты с погрешностью, сопоставимой с погрешностью ОУ. Описанные модели можно эффективно использовать на практике для разработки методик одновременного контроля образцов, а также монолитных и трехслойных конструкций из указанных конструкционных слоистых ПКМ как в процессе стендовых и иных испытаний, так и, в перспективе, в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 122—144. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144
2. Liu Guozeng, Gao Weicheng, Liu Tao. Debonds and Water-Filled Defects Detection in Honeycomb Sandwich Composites Based on Pulse Infrared Thermography NDT Technique // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. No. 5. P. 583—591. [Лю Г., Гао В., Лю В., Цзоу С., Сюй Ц., Лю Т. Контроль нарушений адгезии и дефектов, заполненных водой, в многослойных композитах с сотовым наполнителем методом импульсной инфракрасной томографии // *Дефектоскопия*. 2023. № 5. С. 45—53. DOI: 10.31857/S0130308223050056]
3. Kaledin V.O., Vyachkina E.A., Vyachkin E.S., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. Applying Ultrasonic Thermotomography and Electric-Loading Thermography for Thermal Characterization of Small-Sized Defects in Complex-Shaped Spatial Composite Structures // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 1. P. 58—69. DOI: 10.1134/S1061830920010052
4. Goossens S., Berghmans F., Munoz K., Jiménez M., Karachalios E., Saenz-Castillo D., Geernaert T. A global assessment of barely visible impact damage for CFRP sub-components with FBG-based sensors // *Composite Structures*. 2021. V. 272. P. 1—12. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114025

5. Datta A., Augustin M.J., Gupta N., Viswamurthy S.R., Gaddikeri K.M., Sundaram R. Impact localization and severity estimation on composite structure using fiber Bragg grating sensors by least square support vector regression // *IEEE Sensors Journal*. 2019. V. 19 (12). P. 4463—4470. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2901453
6. Беловолов М.И., Беловолов М.М., Семенов С.Л., Будадин О.Н., Козельская С.О., Кутюрин Ю.Г. Разработка волоконно-оптических датчиков контроля технических характеристик и оценки работоспособности композитных узлов изделий авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) // *Конструкции из композиционных материалов*. 2020. № 3 (159). С. 45—53.
7. Анискович В. А., Будадин О. Н., Кутюрин Ю. Г., Разин А.Ф., Шаклеин А.Ф. Мониторинг напряженно-деформированного состояния изделий из композиционных материалов с использованием волоконно-оптических датчиков // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2018. № 4 (104). С. 126—133.
8. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Serovaev G.S. Strain measurements by FBG-based sensors embedded in various materials manufactured by different technological processes // *Procedia Structural Integrity*: 4th, Virtual, Funchal, Madeira, 30 августа — 02 2021 года. V. 37. Virtual, Funchal, Madeira, 2021. P. 508—516. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.116
9. Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // *Composite Structures*. 2020. V. 239. P. 111844. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111844
10. Jeon S.-J., Park S.Y., Kim S.T. Temperature compensation of fiber bragg grating sensors in smart strand // *Sensors*. 2022. V. 22 (9). 17 p. DOI: 10.3390/s22093282
11. Jung J., Park N., Lee B. Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium:ytterbium-doped fiber // *Applied Optics*. 2000. V. 39 (7). P. 1118—1120. DOI: 10.1364/AO.39.001118
12. Kuang Y., Guo Y., Xiong L., Liu W. Packaging and Temperature Compensation of Fiber Bragg Grating for Strain Sensing: A Survey // *Photonic Sensors*. 2018. V. 8 (10). 12 p. DOI: 10.1007/s13320-018-0504-y
13. Yan W., Guo Z., Wang C., Zhang Y., Du G. Passive temperature compensation package for fiber Bragg grating // *Proc. SPIE*. 2006. V. 6150. DOI:10.1117/12.676531
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. № 12—6. P. 675—677. DOI: 10.1109/68.849081
15. Chehura E., James S.W., Tatam R.P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating // *Optics communications*. 2007. V. 275 (2). P. 344—347. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.03.043
16. 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. V. 16. P. 984—988. DOI: 10.1088/0957-0233/16/4/010
17. Sulejmani S., Sonnenfeld C., Geernaert, Berghmans F., Thienpont H., Eve S., Lammens N., Luyckx G., Voet E., Degrieck J., Urbanczyk W., Mergo P., Becker M., Bartelt H. Towards micro-structured optical fiber sensors for transverse strain sensing in smart composite materials // *Sensors*. 2011. IEEE. P. 109—112. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127305
18. Федотов М.Ю. Особенности создания системы одновременного встроенного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // *Космические аппараты и технологии*. 2023. Т. 7. № 1 (43). С. 24—34. DOI: 10.26732/j.st.2023.1.03
19. Федотов М.Ю. Методы формирования пространственной топологии и опроса волоконно-оптических датчиков для диагностики композитных конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2023. Т. 26. № 4 (298). С. 24—37. DOI: 10.14489/td.2023.04.pp.024-037
20. Федотов М.Ю. Теоретические исследования встроенной волоконно-оптической системы контроля деформации и температуры полимерных композитов // *Контроль. Диагностика*. 2023. Т. 26. № 5 (299). С. 14—25. DOI: 10.14489/td.2023.05.pp.014-025
21. Sivanesan P., Sirkis J.S., Murata Y., Buckley S.G. Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneously measuring strain and temperature // *Opt. Eng.* 2002. V. 41(10). P. 2456—2463.
22. <http://www.scipy.org>
23. Аксенова Е.Н., Гасников Н.К., Калашиников Н.П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума / Учебно-методическое пособие. М.: МИФИ, 2009. 24 с.
24. Федотов М.Ю. Теоретические аспекты калибровки и оценки погрешностей волоконно-оптической системы диагностики полимерных композитов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2023. № 2 (170). С. 43—51. DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_43