Паньков, А.А. Математическая модель встраиваемого оптоволоконного TFBGs-датчика с наклонными брэгговскими решетками для диагностирования сложного деформированного состояния в полимерных композитных конструкциях / А.А. Паньков. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.2.06 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 2. – С. 70–83.

Perm Polytech Style: Pan'kov A.A. The Mathematical Model of a Built-In Fiber Optic TFBGs Sensor with Tilted Bragg Gratings for Diagnosing a Complex Deformed State in Polymer Composite Structures. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 2, pp. 70-83. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.2.06

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 2, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.2.06
УДК 539.3; 535.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВСТРАИВАЕМОГО ОПТОВОЛОКОННОГО TFBGS-ДАТЧИКА С НАКЛОННЫМИ БРЭГГОВСКИМИ РЕШЕТКАМИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

А.А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 10 января 2025 г.
Одобрена: 13 апреля 2025 г.
Принята к публикации:
30 мая 2025 г.

Ключевые слова:

встраиваемый оптоволоконный TFBG-датчик, наклонная брэгговская решетка, полимерный композит, объемное напряженно-деформированное состояние, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Разработаны математические модели функционирования и определены численные значения информационных передаточных коэффициентов новых встраиваемых оптоволоконных TFBGs-датчиков (Tilted Fiber Bragg Gratings) с наклонными брэгговскими решетками для диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния внутри нагруженных полимерных композитных конструкций. Оптоволоконные TFBGs-датчики имеют вид кабеля, в котором шесть однонаправленных световодов со встроенными различно-наклоненными брэгговскими решетками размещены с фиксированным взаимным, например, гексагональным расположением в протяженном цилиндрическом сплошном полимерном корпусе датчика. Различные пространственные ориентации отражающих поверхностей для различных световодов были заданы через координаты некомпланарных нормалей к этим поверхностям. Численное моделирование деформационных полей в элементах оптоволоконного TFBGs-датчика осуществлено для расчетной области «композит/встроенный датчик» в рамках линейной теории упругости. Представлены цветовые эпюры распределений различных компонент поля деформаций по серединному поперечному сечению расчетной области при соответствующих простых случаях ее макродеформирования и даны численные значения осредненных по области каждого световода компонент тензора деформаций. Далее значения компонент осредненных по световодам деформаций использованы для вычисления осевых деформаций вдоль некомпланарных векторов – нормалей к отражающим поверхностям наклонных брэгговских решеток. В результате найдены численные значения искомых информационных передаточных коэффициентов оптоволоконного TFBGs-датчика с учетом заданных ориентаций отражающих поверхностей наклонных брэгговских решеток световодов датчика. Таким образом, задача диагностирования сложного деформированного состояния внутри нагруженной полимерной композитной конструкции в локальной окрестности встроенного в нее оптоволоконного TFBGs-датчика сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно искомых шести независимых компонент тензора макродеформаций этой окрестности по измеряемым спектрам отражений световодов датчика.

© **Паньков Андрей Анатольевич** – д. ф.-м. н., доцент, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, e-mail: a_a_pankov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8477-5206

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Docent, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, e-mail: a_a_pankov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8477-5206

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THE MATHEMATICAL MODEL OF A BUILT-IN FIBER OPTIC TFBGS SENSOR WITH TILTED BRAGG GRATINGS FOR DIAGNOSING A COMPLEX DEFORMED STATE IN POLYMER COMPOSITE STRUCTURES

A.A. Pan'kov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 January 2025
Approved: 13 April 2025
Accepted for publication:
30 May 2025

Keywords:

built-in fibre-optic TFBG-sensor, tilted Bragg gratings, polymer composite, volumetric stress-strain state, numerical modelling.

ABSTRACT

The paper presents mathematical models of functioning and numerical values of information transfer coefficients for new built-in fibre-optic TFBGs-sensors (Tilted Fiber Bragg Gratings) with tilted Bragg gratings to diagnose a complex stress-strain state inside loaded polymer composite structures. The fiber optic TFBGs sensors have the form of a continuous structured cable system, in which six unidirectional light guides with the built-in Bragg gratings are placed with a fixed mutual hexagonal arrangement in extended continuous cylindrical polymer sensor housing. Different 3D orientations of reflecting surfaces for different light guides were defined through the coordinates of non-planar normals to these surfaces. Numerical modeling of deformation fields in the elements of the fiber optic TFBGs-sensor was carried out for the calculation area *composite material/built-in sensor* within the linear theory of elasticity. We present color diagrams of distributions for various components of the strain field along the middle cross-section of the calculation area with corresponding simple cases of its macrostrains. Also we give numerical values of strain tensor components averaged over the area of each light guide. Further, values of strain components averaged over the light guides are used to calculate axial strains along non-planar vectors - normals to reflecting surfaces of the tilted Bragg gratings. As a result, numerical values of the desired information transfer coefficients of the fibre-optic TFBGs sensor were found taking into account given orientations of reflecting surfaces of the tilted Bragg gratings of the sensor light guides. Thus, the task of diagnosing a complex deformed state inside a loaded polymer composite structure in a local neighborhood of a built-in fiber optic TFBGs sensor is reduced to solving a system of linear algebraic equations regarding the desired six independent components of the macrodeformation tensor of this neighborhood from the measured spectra of reflections of the optical fibers of the sensor.

Введение

Оптоволоконные датчики, в частности, со встроенными в световод брэгговскими решетками, широко используются в различных отраслях науки и техники [1–5] для измерения различных физико-механических величин, что необходимо для современных систем управления и адаптации свойств ответственных конструкций, например, аэрокосмической техники к меняющимся условиям эксплуатации. Оптоволоконные датчики могут быть установлены на поверхности конструкции или внедрены внутрь, например, полимерной композитной конструкции на этапе ее производства с целью «самодиагностики», т.е. индикации наличия возможных технологических дефектов типа пор, непроклеев, смятий армирующих волокон или слоев ткани (препрега), удаленного мониторинга эволюции изменения свойств композита на структурном уровне [6; 7], диагностирования типа и величины напряженного состояния, локации опасных зон с критическими нагрузками, выявления возможных эксплуатационных микроповреждений, в частности: разрывов армирующих элементов, отслоений по межфазным поверхностям и растрескивания матрицы (связующего) полимерного композита, актуальной оценки прочности композита и конструкции в целом [8–18]. Современные технологии сенсорной техники позволяют создавать оптоволоконные брэгговские решетки различной структуры и назначения [19–21]. Необходимость разработки новых встраиваемых оптоволоконных датчиков для диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния внутри полимерных композитных конструкций обусловлена потребностью повышения точности, чувствительности, ширины рабочего диапазона измерений и упрощения технологии создания таких датчиков. Предложенные в [22] оптоволоконные TFBGs-датчики с наклонными брэгговскими решетками (Tilted Fiber Bragg Gratings) предназначены для диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния внутренних и/или приповерхностных областей – окрестностей TFBGs-датчиков, встроенных внутрь или установленных на поверхности диагностируемых полимерных композитных конструкций. Оптоволоконные TFBGs-датчики имеют вид многожильного кабеля, в котором шесть однонаправленных световодов со встроенными различно наклоненными брэгговскими решетками размещены с фиксированным взаимным, например гексагональным, расположением в протяженном цилиндрическом сплошном полимерном корпусе датчика. Известные оптоволоконные датчики [23–27] с наклонными брэгговскими решетками не использовались ранее для диагностирования сложного напряженно-деформированно-

го состояния внутри нагруженных полимерных композитных конструкций. Рассматриваемые оптоволоконные TFBGs-датчики с наклонными брэгговскими решетками более просты в изготовлении по сравнению, например, с известными встраиваемыми оптоволоконными пьезоэлектролюминесцентными [28; 29] и механофотолюминесцентными [30] датчиками сложного напряженного состояния с учетом, что современные технологии изготовления различных оптоволоконных брэгговских решеток хорошо отработаны и имеют высокий уровень развития. Необходимость использования в TFBGs-датчиках световодов с наклонными брэгговскими решетками обусловлена однонаправленностью световодов в датчике, например, по оси r_3, из-за чего их продольные деформации $\varepsilon_{33(k)}$ равны значению компоненты ε^*_{33} диагностируемого тензора $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ макродеформаций. Поэтому при использовании традиционных «поперечных» брэгговских решеток это равенство $\varepsilon_{33(k)} = \varepsilon^*_{33}$ обусловливает одинаковые деформационные изменения значений периодов брэгговских решеток и, как результат, одинаковые значения информативных смещений измеряемых спектров отражений для различных световодов как функций лишь компоненты ε^*_{33} без учета других компонент ε^*_{ij} диагностируемого тензора $\boldsymbol{\varepsilon}^*$, $k = \overline{1,6}$. Таким образом, невозможность использования однонаправленных световодов с традиционными брэгговскими решетками для прогнозирования сложного деформированного состояния $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ обусловливает применение в TFBGs-датчиках световодов с наклонными брэгговскими решетками, в которых отражающие элементы (области периодического изменения коэффициента преломления) ориентированы под некоторыми заданными углами к поперечным сечениям световодов и, как результат, на информативные значения деформированных периодов которых теперь уже будут влиять все искомые компоненты ε^*_{ij} диагностируемого тензора макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^*$.

Цель исследования – разработка математических моделей и нахождение численных значений характеристик – управляющих и информационных передаточных коэффициентов встраиваемых оптоволоконных TFBGs-датчиков [22] для диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния внутри нагруженных полимерных композитных конструкций с использованием световодов с различно наклоненными брэгговскими решетками.

Принцип диагностироваңя

Принцип «шести направлений» диагностирования сложного деформированного состояния **ε*** (как суперпозиции трех растяжений и трех сдвигов в декартовой системе координат *x, y, z*) с использованием предложенного TFBGs-датчика проиллюстрируем на примере, в котором упругие свойства световодов и в целом датчика не отличаются от упругих свойств однородной области конструкционного материала. Искомые шесть независимых компонент ε^*_{ij} тензора деформаций **ε*** можно найти по измеренным (каким-либо возможным способом) значениям продольных деформаций e_k вдоль шести различных некомпланарных направлений $\mathbf{l}_k$ для этой области из решения системы шести линейных алгебраических уравнений $\varepsilon^*_{ij} l_{(k)i} l_{(k)j} = e_k$ в виде

$$a_{kp} x_p = e_k$$

относительно искомых величин

$$\mathbf{x} = \{\varepsilon^*_{11}, \varepsilon^*_{22}, \varepsilon^*_{33}, 2\varepsilon^*_{23}, 2\varepsilon^*_{13}, 2\varepsilon^*_{12}\},$$

где индексы $k, p = \overline{1,6}$, передаточные коэффициенты

$$a_{k1} = l_{(k)1} l_{(k)1},\ a_{k2} = l_{(k)2} l_{(k)2},\ a_{k3} = l_{(k)3} l_{(k)3},$$
$$a_{k4} = l_{(k)2} l_{(k)3},\ a_{k5} = l_{(k)1} l_{(k)3},\ a_{k6} = l_{(k)1} l_{(k)2}$$

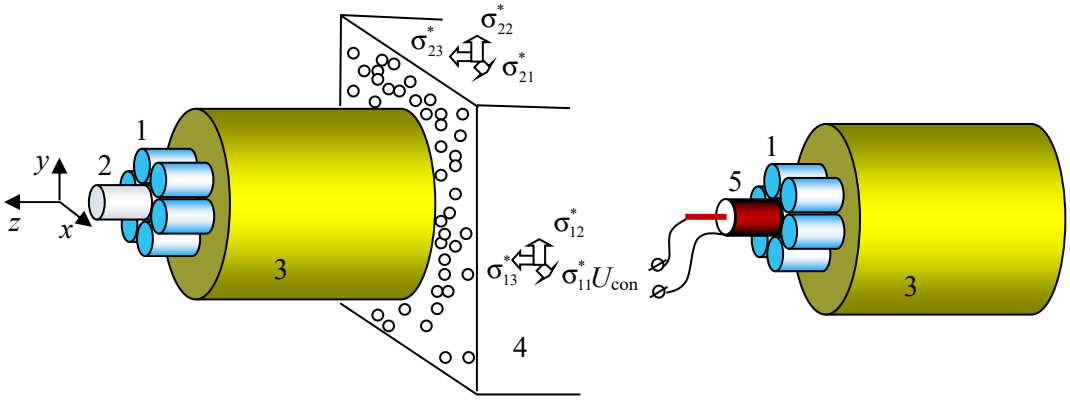
для рассматриваемого случая однородности (т.е. независимости от координат) упругих свойств области «материал/встроенный датчик», так как имеем равенство $a_{kp} = l_{(k)i} l_{(k)j}$, в котором численные значения пары индексов *ij* связаны с численным значением индекса *p* следующим образом: 11 → 1, 22 → 2, 33 → 3, 23 → 4, 13 → 5, 12 → 6. Возможность нахождения искомых компонент ε^*_{ij} тензора деформаций **ε*** по совокупности значений продольных деформаций e_k подтверждена вычислением численного значения главного определителя $\Delta = \left| a_{kp} \right| \neq 0$ для заданных модельных значений координат $l_{(k)i}$ направлений $\mathbf{l}_k$. Значения продольных деформаций e_k гипотетически возможно измерить с использованием, например, шести разнонаправленных световодов с однотипными «поперечными» брэгговскими решетками, проходящими через диагностируемую область по различным направлениям $\mathbf{l}_k$, где $k = \overline{1,6}$, что трудно реализуемо на практике, особенно при множестве локальных областей – «макроточек» диагностирования.

В предложенном оптоволоконном TFBGs-датчике [22] значения продольных деформаций e_k по шести различным некомпланарным направлениям $\mathbf{l}_k$ измеряются с использованием шести однонаправленных световодов с различно наклоненными брэгговскими решетками с нормалями $\mathbf{n}_k = \mathbf{l}_k$ к своим отражающим поверхностям. Однонаправленность световодов позволяет их компактно и монолитно объединить общим гибким полимерным (например, цилиндрическим) корпусом (рис.1) с функцией буферного слоя – механического фильтра для «защиты» измерительных элементов (брэгговских решеток) от случайных быстро осциллирующих составляющих **ε'(r)** – пульсаций микроуровневых деформаций композитной области в окрестности встроенного

TFBGs-датчика. В результате из внешней области через буферный слой на измерительные элементы TFBGs-датчика транслируется лишь величина постоянной макроскопической составляющей **ε*** действительного неоднородного поля деформаций **ε**(**r**)=**ε***+**ε'**(**r**) композитной области в окрестности встроенного датчика; трансляцию характеризуют значения передаточных коэффициентов a_{kp} датчика. Учет неоднородности расчетной области «композит/встроенный датчик» по упругим свойствам отразится на уточнении решения для передаточных коэффициентов a_{kp} TFBGs-датчика, численные значения которых $a_{kp} \neq l_{(k)i} l_{(k)j}$ будут учитывать особенности укладки однонаправленных, например, по оси *z*, световодов в поперечной плоскости *xy*, в частности, правильную гексагональную укладку или в ряд по оси *x* [22], и могут быть найдены в результате численного моделирования системы «композит/встроенный датчик» для совокупности шести простых случаев макродеформаций $\varepsilon^*_{11}, \varepsilon^*_{22}, \varepsilon^*_{33}, 2\varepsilon^*_{23}, 2\varepsilon^*_{13}, 2\varepsilon^*_{12}$ при «единичных» значениях. В общем взаимное расположение однонаправленных световодов в TFBGs-датчике осуществляется из принципа технологичности сборки и компактности их укладки, чтобы поперечный размер (диаметр) TFBGs-датчика с буферным слоем не превышал установленный характерный размер квазиоднородности диагностируемого поля макродеформаций в исследуемой области композитной конструкции. Отметим, что результатом диагностирования являются компоненты ε^*_{ij} тензора деформаций **ε*** в декартовой локальной системе координат *x, y, z*, к которой «привязаны», т.е. в которой были найдены информативные передаточные коэффициенты a_{kp} TFBGs-датчика. На технологическом этапе встраивания оптоволоконного TFBGs-датчика в структуру полимерного композиционного материала возможны случайные повороты локальной системы координат *x, y, z* TFBGs-датчика вокруг продольной оси $z=r_3$ относительно лабораторной системы координат $r_{1,2,3}$ конструкции, что необходимо учитывать при переходе от найденных компонент ε^*_{ij} в локальной системе *x, y, z* к соответствующим значениям компонент в лабораторной системе координат $r_{1,2,3}$. Повороты TFBGs-датчика в поперечной плоскости *xy* несущественны лишь при вычислении и использовании инвариантов тензора деформаций **ε*** и/или напряжений $\sigma^*_{ij} = C^*_{ijmn}\varepsilon^*_{mn}$, не зависящих от поворотов системы координат, где C^*_{ijmn} – компоненты тензора **C*** эффективных упругих свойств композита в осях *x, y, z* локальной системы координат. Избежать таких поворотов можно, используя TFBGs-датчик ленточной формы с прямоугольным поперечным сечением и плотной укладкой световодов в ряд по ширине узкой тонкой полимерной ленты – корпуса датчика [22]. В результате встроенный внутрь полимерной композитной конструкции, находящейся при эксплуатационных нагрузках, оптоволоконный TFBGs-датчик позволяет определить искомый тензор макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ сложного деформированного состояния в своей композитной окрестности по результатам измерений спектров отражения всех шести световодов.

Математические модели TFBGs-датчиков

Встраиваемые оптоволоконные TFBGs-датчики диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния области (в окрестности датчика) нагруженных полимерных композитных конструкций изображены на рис. 1, в которых шесть световодов с различно наклоненными брэгговскими решетками расположены, например, вокруг вспомогательного световода с традиционной «поперечной» брэгговской решеткой (см. рис. 1, *a*) или пьезоэлектрического кабеля с выходами электродов для подключения управляющего электрического напряжения U_{con} (см. рис. 1, *b*).



a *b*

Рис. 1. Встраиваемые оптоволоконные датчики: *1* – световоды с наклонными ВБР; *2* – световод с традиционной ВБР (*a*); *3* – буферный слой (корпус); *4* – диагностируемая область; *5* – пьезоэлектрический кабель с выходами электродов (*b*)

Fig. 1. Built-in fiber optic sensors: *1* – light guides with tilted FBG; *2* – light guide with traditional FBG (*a*); *3* – buffer layer (housing); *4* – diagnosed area; *5* – piezoelectric cable with electrode outputs (*b*)

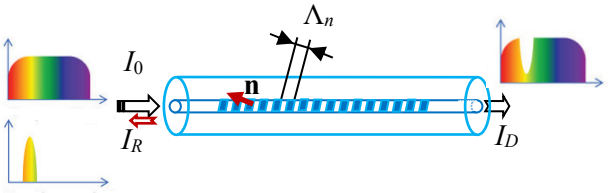


Рис. 2. Наклонная ВБР с периодом Λ_n по нормали **n** к отражающим поверхностям

Fig. 2. Tilted FBG with period Λ_n along normal **n** of reflecting surfaces

Волоконная брэгговская решетка представляет собой оптический интерферометр, встроенный в световод (рис. 2), в рассматриваемом случае для k-й «наклонной» брэгговской решетки – это периодическое изменение показателя преломления k-го световода с начальным (т.е. до деформации) периодом $\Lambda_{n0(k)}$ по нормали $\mathbf{n}_k$ к отражающим поверхностям, например, одномодового оптического волокна, где $k=\overline{1,6}$. Векторы $\mathbf{n}_k$ – нормали отражающих поверхностей –являются некомпланарными, например, с координатами (рис. 3)

$$n_{(k)x}=\cos\alpha_k\sin\theta_k,\ n_{(k)y}=\sin\alpha_k\sin\theta_k,\ n_{(k)z}=\cos\theta_k, \quad (1)$$

выраженными через ориентационные углы α, θ сферической системы координат:

$$\alpha_k=(k-1)\pi/3,\ \theta_k=\theta_{\min}+(k-1)(\theta_{\max}-\theta_{\min})/5, \quad (2)$$

выполняются равенства $\theta_1=\theta_{\min}$, $\theta_6=\theta_{\max}$ с учетом $k=\overline{1,6}$, $\theta_{\min}$, $\theta_{\max}$ – заданные минимальное и максимальное значения угла θ, например: $\theta_{\min}=\pi/4$, $\theta_{\max}=\pi/3$. Угол между продольной осью z и отражающими поверхностями брэгговской решетки k-го световода равен $\pi/2-\theta_k$. Полимерный цилиндрический корпус TFBGs-датчика (см. рис. 1) обеспечивает несколько функций: фиксацию заданного взаимного расположения, например, гексагональной укладки световодов, защиту световодов от внешних механических повреждений. При этом корпус как буферный слой между измерительными элементами – брэгговскими решетками и диагностируемой микронеоднородной композитной областью в окрестности встроенного в конструкцию (нагруженной эксплуатационными термосиловыми воздействиями) TFBGs-датчика – выполняет еще важную функцию механического фильтра для защиты измерительных элементов от негативных стохастических быстро осциллирующих составляющих деформационных полей из композитной окрестности. В результате работы такого фильтра имеем детерминированную функциональную зависимость результатов измерений от диагностируемых макроскопических значений напряжений **σ*** и/или деформаций **ε*** композитной окрестности, что обусловливает постоянство передаточных информационных коэффициентов $a_{(k)mn}$ встраиваемого TFBGs-датчика. Таким образом, оптимальный диаметр корпуса как буферного слоя должен, во-первых, минимизировать «паразитные» влияния пульсаций **σ'**, **ε'** – стохастических отклонений (деформационных полей **σ**, **ε** от соответствующих усредненных значений **σ***, **ε***) быстро осциллирующих составляющих, обусловленных вероятностным расположением структурных неоднородностей композита вблизи внешней цилиндрической поверхности корпуса TFBGs-датчика, внедренного в полимерную композитную конструкцию, и, во-вторых, не превышать характерный размер «квазиоднородности», т.е. существенного изменения полей макродеформирования **σ***, **ε***, превышение которого приводит к необходимости учитывать градиенты $\nabla\boldsymbol{\sigma}^*$, $\nabla\boldsymbol{\varepsilon}^*$ этих полей при расшифровке измеренных спектров отражений световодов. Из первого условия следует, что толщина полимерной прослойки (между световодами и внешней цилиндрической поверхностью корпуса) должна составлять не менее двух значений характерного размера неоднородностей, например, диаметра армирующих волокон в композитной окрестности TFBGs-датчика. Второе условие обусловлено тем, что передаточные информационные коэффициенты $a_{(k)mn}$ встраиваемого TFBGs-датчика определяются для макрооднородного напряженно-деформированного состояния без учета градиентов $\nabla\boldsymbol{\sigma}^*$, $\nabla\boldsymbol{\varepsilon}^*$ в представительной области dV^* «композит/встроенный датчик». Наличие в датчике (см. рис. 1, *b*) пьезоэлектрического кабеля [31; 32] позволяет управлять характеристиками оптоволоконных брэгговских решеток, т.е. изменять период решеток посредством деформирования световодов в результате обратного пьезоэлектрического эффекта кабеля при подключении к выходам его электродов управляющего электрического напряжения U_{con}. Для световодов датчика считаем известными начальные спектры отражения $\bar{R}_{0(k)}(\lambda)$ их брэгговских решеток с центральными длинами волн $\lambda_{0(k)}=2n_{\text{eff}(k)}\Lambda_{n0(k)}$ [23], где $n_{\text{eff}(k)}=n_{\text{eff}}/\cos\theta_k$ – эффективный показатель преломления k-го световода для центральной длины волны $\lambda_{0(k)}$, θ_k – угол между вектором нормали $\mathbf{n}_k$ и продольной осью z этого световода (рис. 3), n_{eff} – для традиционной брэгговской решетки [33; 34].

При сложном деформировании **ε*** композитной окрестности датчика (см. рис. 1) и случая действия на выходы электродов пьезоэлектрического кабеля управляющего электрического напряжения U_{con} в световодах датчика (см. рис. 1, *b*) возникают деформации

$$\varepsilon_{(k)ij}=n_{U(k)ij}U_{\text{con}}+N_{(k)ij\alpha\beta}\varepsilon^*_{\alpha\beta}, \quad (3)$$

и, как следствие, имеем осевые деформации

$$e_{n(k)}=\varepsilon_{(k)\alpha\beta}n_{(k)\alpha}n_{(k)\beta} \quad (4)$$

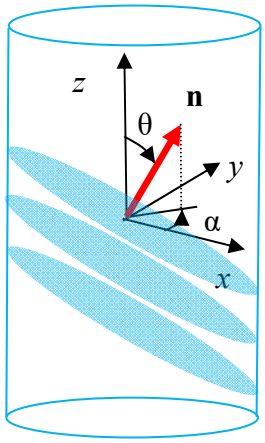


Рис. 3. Ориентационные углы α, θ нормали **n** поверхностей отражения наклонной брэгговской решетки

Fig. 3. Orientation angles α, θ of normal **n** for reflection surfaces of the inclined Bragg grating

по нормали $\mathbf{n}_k$ к отражающим поверхностям k-й брэгговской решетки, где $n_{(k)i}$ – координаты нормали $\mathbf{n}_k$, $\varepsilon_{(k)ij}$ – компоненты тензора $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ деформаций световода; тензоры управляющих коэффициентов влияния

$$n_{U(k)ij} = \varepsilon_{(k)ij}\big|_{\boldsymbol{\varepsilon}^*=0} / U_{\text{con}}$$

находим при условиях: $U_{\text{con}} \neq 0$, $\boldsymbol{\varepsilon}^* = 0$. В выражении (3) компоненты $N_{(k)ijmn}$ тензора $\mathbf{N}_k$ концентраций деформаций введены равенством

$$\varepsilon_{(k)ij}\big|_{U_{\text{con}}=0} = N_{(k)ij\alpha\beta}\varepsilon^*_{\alpha\beta}; \qquad (5)$$

здесь и далее тензорные немые индексы суммирования обозначены греческими, а свободные индексы – латинскими буквами со значениями $\overline{1,3}$. При численном моделировании компоненты $\varepsilon_{(k)ij}$ тензора $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ деформаций отождествляем с осредненными по области $\mathbf{V}_k$ k-го световода значениями, т.е $\boldsymbol{\varepsilon}_k = \int_{\mathbf{V}_k} \boldsymbol{\varepsilon} dV / V_k$, где $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})$ – действительное поле деформаций (найденное из решения краевой задачи теории упругости для системы «композит/встроенный датчик») как функция координат $\mathbf{r} \in \mathbf{V}_k$.

В результате из выражений (3), (4) следует формула для осевых деформаций

$$e_{n(k)} = a_{U(k)}U_{\text{con}} + a_{(k)\alpha\beta}\varepsilon^*_{\alpha\beta}, \qquad (6)$$

по нормали $\mathbf{n}_k$ световодов, где $a_{U(k)}$, $a_{(k)mn}$ – управляющие скалярные и информационные тензорные передаточные коэффициенты TFBGs-датчика (см. рис. 1, *b*)

$$a_{U(k)} = n_{(k)\alpha}n_{(k)\beta}n_{U(k)\alpha\beta}, \; a_{(k)mn} = n_{(k)\alpha}n_{(k)\beta}N_{(k)\alpha\beta mn}. \qquad (7)$$

Величины осевых деформаций (6) могут быть записаны

$$e_{n(k)} = a_{U(k)}U_{\text{con}} + a^{(\sigma)}_{(k)\alpha\beta}\sigma^*_{\alpha\beta} \qquad (8)$$

через искомые компоненты σ^*_{mn} тензора $\boldsymbol{\sigma}^*$ макронапряжений композитной окрестности встроенного TFBGs-датчика, где $a^{(\sigma)}_{(k)mn}$ – информационные передаточные коэффициенты TFBGs-датчика (см. рис. 1, *b*), выполняется равенство $a_{(k)mn} = a^{(\sigma)}_{(k)\alpha\beta}C^*_{\alpha\beta mn}$ или $a_{(k)mn} = C^*_{mn\alpha\beta}a^{(\sigma)}_{(k)\alpha\beta}$ с учетом симметрии $C^*_{ijmn} = C^*_{mnij}$ тензора $\mathbf{C}^*$ эффективных упругих свойств композита [35; 36].

Наличие осевых деформаций $e_{n(k)}$ (6) брэгговских решеток световодов обусловливают измеряемые информативные «смещения» по оси абсцисс

$$\Delta_{n(k)} \equiv \lambda_{\varepsilon(k)}(\varepsilon) - \lambda_{0(k)} = \lambda_{0(k)}e_{n(k)} \qquad (9)$$

спектров отражения

$$\bar{R}_{\varepsilon(k)} \equiv \bar{R}_{0(k)}(\lambda - \Delta_{n(k)}), \qquad (10)$$

где $\lambda_{\varepsilon(k)} = 2n_{\text{eff}(k)}\Lambda_{n(k)}$ – центральные длины волн спектров отражения $\bar{R}_{\varepsilon(k)}$ деформированных брэгговских решеток с учетом величин деформированных периодов $\Lambda_{n(k)}(\varepsilon) = \Lambda_{n0(k)}(1 + e_{n(k)})$. Из равенств (6), (8), (9) следует система шести линейных алгебраических уравнений

$$a_{(k)\alpha\beta}\varepsilon^*_{\alpha\beta} = \Delta_{n(k)} / \lambda_{0(k)} - a_{U(k)}U_{\text{con}}$$

в виде

$$\begin{cases} a_{(1)11}\varepsilon^*_{11} + a_{(1)22}\varepsilon^*_{22} + \ldots + a_{(1)12}\varepsilon^*_{12} = b_{(1)} \\ \ldots \\ a_{(6)11}\varepsilon^*_{11} + a_{(6)22}\varepsilon^*_{22} + \ldots + a_{(6)12}\varepsilon^*_{12} = b_{(6)}, \end{cases} \qquad (11)$$

где коэффициенты правой части

$$b_{(k)} = \Delta_{n(k)} / \lambda_{0(k)} - a_{U(k)}U_{\text{con}} \qquad (12)$$

для нахождения искомых шести независимых компонент ε^*_{11}, ε^*_{22}, ε^*_{33}, ε^*_{23}, ε^*_{13}, ε^*_{12} тензора макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ или компонент σ^*_{11}, σ^*_{22}, σ^*_{33}, σ^*_{23}, σ^*_{13}, σ^*_{12} тензора макронапряжений $\boldsymbol{\sigma}^*$

$$a^{(\sigma)}_{(k)\alpha\beta}\sigma^*_{\alpha\beta} = b_{(k)}$$

по измеряемым значениям смещений $\Delta_{n(k)}$ спектров отражения $\bar{R}_{\varepsilon(k)}$ (10) световодов при заданном управляющем электрическом напряжении $U_{\text{con.}}$ (12). Формулы (3), (6), (8), (11), (12) получены для оптоволоконного датчика на рис. 1, *b*, с наличием пьезоэлектрического кабеля и действием управляющего электрического напряжения U_{con}.

Формулы для оптоволоконного TFBGs-датчика на рис. 1, *a*, без пьезоэлектрического кабеля имеем, полагая U_{con}=0; например, система алгебраических уравнений (11), (12) примет вид

$$a'_{(k)\alpha\beta}\,\varepsilon^{*}_{\alpha\beta} = \Delta_{n(k)} / \lambda_{0(k)}, \qquad (13)$$

где информационные передаточные коэффициенты датчика на рис.1, *a*

$$a'_{(k)mn} = n_{(k)\alpha} n_{(k)\beta} N'_{(k)\alpha\beta mn}, \qquad (14)$$

в общем отличные от аналогичных коэффициентов $a_{(k)mn}$ TFBGs-датчика на рис. 1, *b*, где $N'_{(k)ijmn}$ – компоненты тензора $\mathbf{N}'_k$ концентраций деформаций с учетом разложений осредненных по области каждого *k*-го световода деформаций

$$\varepsilon'_{(k)ij} = N'_{(k)ij\alpha\beta}\,\varepsilon^{*}_{\alpha\beta} \qquad (15)$$

и осевых деформаций

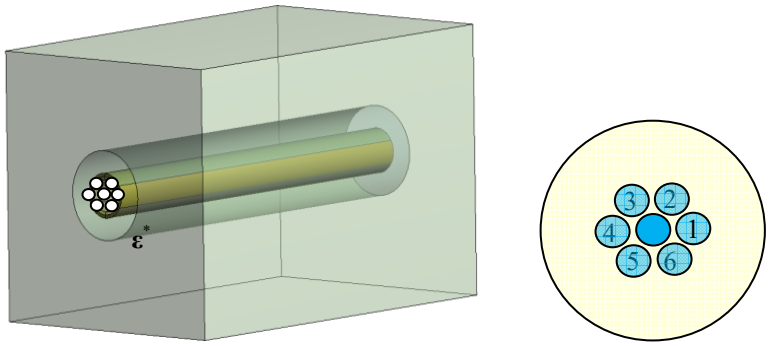
$$e'_{n(k)} = \varepsilon'_{(k)\alpha\beta} n_{(k)\alpha} n_{(k)\beta} \qquad (16)$$

вдоль некомпланарных векторов $\mathbf{n}_k$ для TFBGs-датчика (см. рис. 1, *a*) по аналогии (4), (5).

Передаточные коэффициенты: $a_{U(k)}$, $a_{(k)mn}$, $a^{(\sigma)}_{(k)mn}$ и $a'_{(k)mn}$, $a'^{(\sigma)}_{(k)mn}$ — характеристики соответствующих оптоволоконных TFBGs-датчиков на рис.1, *b*, *a*, могут быть определены в результате численного моделирования методами механики композитов или экспериментально с использованием образца композитного материала со встроенным оптоволоконным датчиком (см. рис. 1).

Результаты численного моделирования

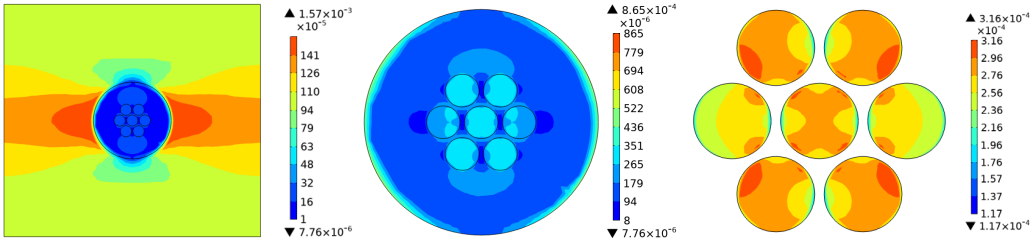
Рассмотрим вычисление информационных передаточных коэффициентов $a'_{(k)mn}$ оптоволоконного TFBGs-датчика на рис. 1, *a*, с учетом заданных ориентаций отражающих



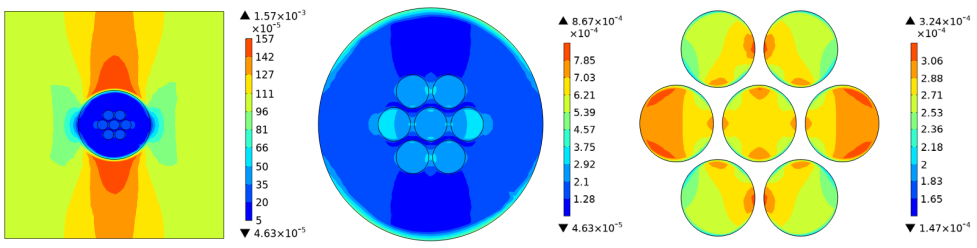
a *b*

Рис. 4. Расчетная схема (*a*), расположение и нумерация световодов в буферном слое (*b*) датчика

Fig. 4. Design diagram (*a*), location and numbering of optical fibers in the buffer layer (*b*) of the sensor



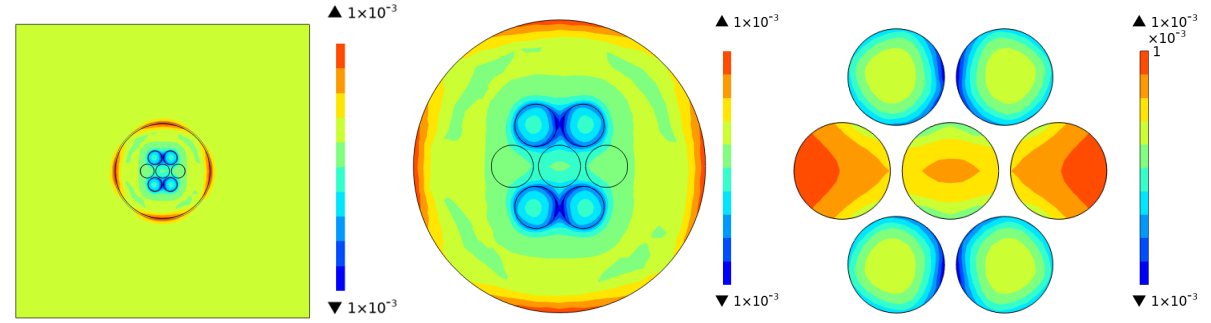
a



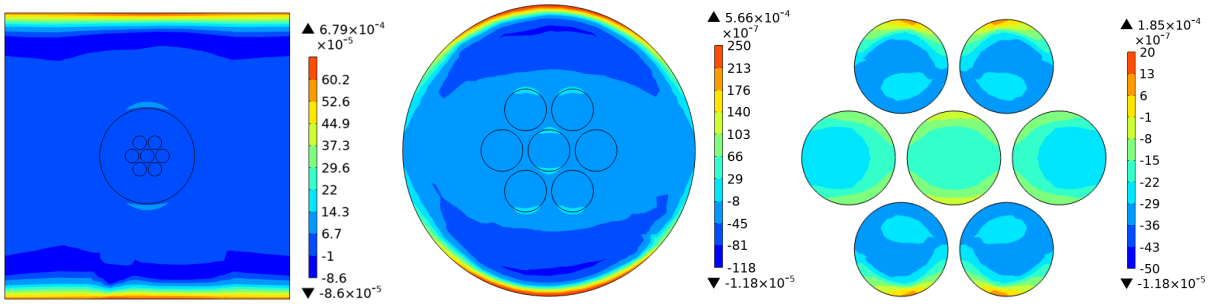
b

Рис. 5. Поля осевых ε_{11} при $\varepsilon^{*}_{11} = 0{,}001$ (*a*), ε_{22}, $\varepsilon^{*}_{22} = 0{,}001$ (*b*), ε_{33}, $\varepsilon^{*}_{33} = 0{,}001$ (*c*) и сдвиговых ε_{23} при $\varepsilon^{*}_{23} = \varepsilon^{*}_{32} = 0{,}001$ (*d*), ε_{13}, $\varepsilon^{*}_{13} = \varepsilon^{*}_{31} = 0{,}001$ (*e*), ε_{12}, $\varepsilon^{*}_{12} = \varepsilon^{*}_{21} = 0{,}001$ (*f*) деформаций по серединному поперечному сечению расчетной области

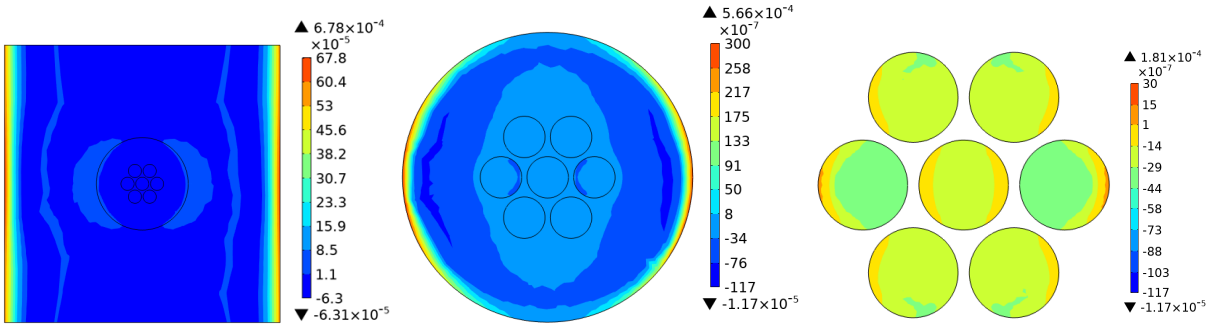
Fig. 5. Fields of axial ε_{11} at $\varepsilon^{*}_{11} = 0.001$ (*a*), ε_{22}, $\varepsilon^{*}_{22} = 0.001$ (*b*), ε_{33}, $\varepsilon^{*}_{33} = 0.001$ (*c*) and shear ε_{23} at $\varepsilon^{*}_{23} = \varepsilon^{*}_{32} = 0.001$ (*d*), ε_{13}, $\varepsilon^{*}_{13} = \varepsilon^{*}_{31} = 0.001$ (*e*), ε_{12}, $\varepsilon^{*}_{12} = \varepsilon^{*}_{21} = 0.001$ (*f*) strains along the middle cross-section of the design area



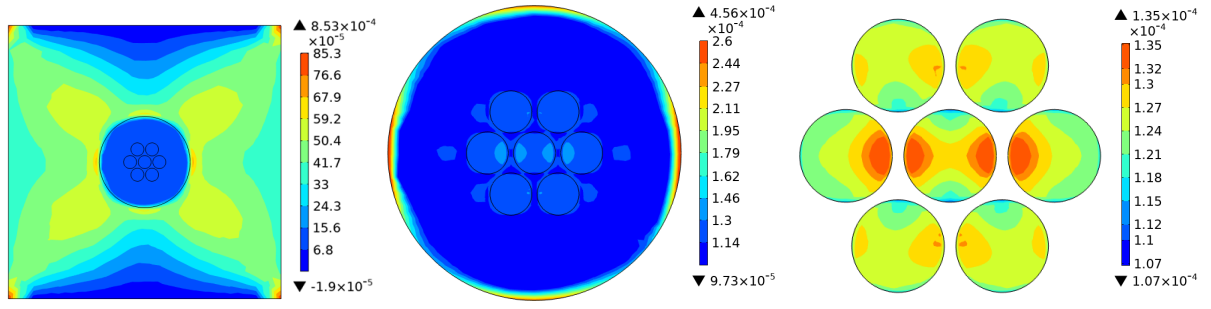
c



d



e



f

Рис. 5. Окончание

Fig. 5. The end

Таблица 1

Относительные величины $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{11}$ при $\varepsilon^*_{11} \neq 0$

Table 1

Relative value of $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{11}$ if $\varepsilon^*_{11} \neq 0$

Номер волокна, k	$\varepsilon_{(k)11} / \varepsilon^*_{11}$	$\varepsilon_{(k)22} / \varepsilon^*_{11}$	$\varepsilon_{(k)33} / \varepsilon^*_{11}$	$\varepsilon_{(k)23} / \varepsilon^*_{11}$	$\varepsilon_{(k)13} / \varepsilon^*_{11}$	$\varepsilon_{(k)12} / \varepsilon^*_{11}$
0	0,2781	-0,1037	0	0	0	0
1	0,2617	-0,1002	0	0	0	0
2	0,2839	-0,1018	0	0	0	-0,0130
3	0,2839	-0,1018	0	0	0	0,0129
4	0,2617	-0,1002	0	0	0	0
5	0,2839	-0,1051	0	0	0	-0,0129
6	0,2839	-0,1051	0	0	0	0,0129

Таблица 2

Относительные величины $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{22}$ при $\varepsilon^*_{22} \neq 0$

Table 2

Relative value of $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{22}$ if $\varepsilon^*_{22} \neq 0$

Номер волокна, k	$\varepsilon_{(k)11} / \varepsilon^*_{22}$	$\varepsilon_{(k)22} / \varepsilon^*_{22}$	$\varepsilon_{(k)33} / \varepsilon^*_{22}$	$\varepsilon_{(k)23} / \varepsilon^*_{22}$	$\varepsilon_{(k)13} / \varepsilon^*_{22}$	$\varepsilon_{(k)12} / \varepsilon^*_{22}$
0	0,0075	0,2781	0	0	0	0
1	-0,0059	0,2921	0	0	0	0
2	0,0150	0,2687	0	0	0	-0,0122
3	0,0151	0,2687	0	0	0	0,0122
4	-0,0058	0,2921	0	0	0	0
5	0,0150	0,2687	0	0	0	-0,0122
6	0,0150	0,2687	0	0	0	0,0122

Таблица 3

Относительные величины $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{33}$ при $\varepsilon^*_{33} \neq 0$

Table 3

Relative value of $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{33}$ if $\varepsilon^*_{33} \neq 0$

Номер волокна, k	$\varepsilon_{(k)11} / \varepsilon^*_{33}$	$\varepsilon_{(k)22} / \varepsilon^*_{33}$	$\varepsilon_{(k)33} / \varepsilon^*_{33}$	$\varepsilon_{(k)23} / \varepsilon^*_{33}$	$\varepsilon_{(k)13} / \varepsilon^*_{33}$	$\varepsilon_{(k)12} / \varepsilon^*_{33}$
0	-0,2240	-0,2240	1	0	0	0
1	-0,2519	-0,1980	1	0	0	0
2	-0,2116	-0,2384	1	0	0	-0,0235
3	-0,2115	-0,2385	1	0	0	0,0233
4	-0,2518	-0,1981	1	0	0	0
5	-0,2115	-0,2384	1	0	0	-0,0234
6	-0,2115	-0,2384	1	0	0	0,0234

Таблица 4

Относительные величины $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{23}$ при $\varepsilon^*_{23} = \varepsilon^*_{32} \neq 0$

Table 4

Relative value of $\varepsilon_{(k)ij} / \varepsilon^*_{23}$ if $\varepsilon^*_{23} = \varepsilon^*_{32} \neq 0$

Номер волокна, k	$\varepsilon_{(k)11} / \varepsilon^*_{23}$	$\varepsilon_{(k)22} / \varepsilon^*_{23}$	$\varepsilon_{(k)33} / \varepsilon^*_{23}$	$\varepsilon_{(k)23} / \varepsilon^*_{23}$	$\varepsilon_{(k)13} / \varepsilon^*_{23}$	$\varepsilon_{(k)12} / \varepsilon^*_{23}$
0	0	0	0	0,1207	0	0
1	0	0	0	0,1225	0	0
2	0	0	0	0,1200	0	0
3	0	0	0	0,1200	0	0
4	0	0	0	0,1225	0	0
5	0	0	0	0,1200	0	0
6	0	0	0	0,1200	0	0

Таблица 5

Относительные величины $\varepsilon_{(k)ij}/\varepsilon^*_{13}$ при $\varepsilon^*_{13}=\varepsilon^*_{31}\neq 0$

Table 5

Relative values of $\varepsilon_{(k)ij}/\varepsilon^*_{13}$ if $\varepsilon^*_{13}=\varepsilon^*_{31}\neq 0$

Номер волокна, k	$\varepsilon_{(k)11}/\varepsilon^*_{13}$	$\varepsilon_{(k)22}/\varepsilon^*_{13}$	$\varepsilon_{(k)33}/\varepsilon^*_{13}$	$\varepsilon_{(k)23}/\varepsilon^*_{13}$	$\varepsilon_{(k)13}/\varepsilon^*_{13}$	$\varepsilon_{(k)12}/\varepsilon^*_{13}$
0	0	0	0	0	0,1207	0
1	0	0	0	0	0,1192	0
2	0	0	0	0	0,1216	0
3	0	0	0	0	0,1216	0
4	0	0	0	0	0,1192	0
5	0	0	0	0	0,1216	0
6	0	0	0	0	0,1216	0

Таблица 6

Относительные величины $\varepsilon_{(k)ij}/\varepsilon^*_{12}$ при $\varepsilon^*_{12}=\varepsilon^*_{21}\neq 0$

Table 6

Relative values of $\varepsilon_{(k)ij}/\varepsilon^*_{12}$ if $\varepsilon^*_{12}=\varepsilon^*_{21}\neq 0$

Номер волокна, k	$\varepsilon_{(k)11}/\varepsilon^*_{12}$	$\varepsilon_{(k)22}/\varepsilon^*_{12}$	$\varepsilon_{(k)33}/\varepsilon^*_{12}$	$\varepsilon_{(k)23}/\varepsilon^*_{12}$	$\varepsilon_{(k)13}/\varepsilon^*_{12}$	$\varepsilon_{(k)12}/\varepsilon^*_{12}$
0	0	0	0	0	0	0,1277
1	0	0	0	0	0	0,1264
2	0	0	0	0	0	0,1257
3	0	0	0	0	0	0,1257
4	0	0	0	0	0	0,1264
5	0	0	0	0	0	0,1257
6	0	0	0	0	0	0,1257

Таблица 7

Информация о передаточных коэффициентах $a'_{(k)mn}$ TFBGs-датчика

Table 7

Information gear ratios $a'_{(k)mn}$ TFBGs-sensor

Номер волокна, k	$a'_{(k)11}$	$a'_{(k)22}$	$a'_{(k)33}$	$a'_{(k)23}$	$a'_{(k)13}$	$a'_{(k)12}$
0	0	0	1	0	0	0
1	0,131	-0,003	0,374	0	0,122	0
2	-0,009	0,108	0,309	0,103	0,06	0,06
3	-0,01	0,118	0,244	0,102	-0,059	-0,066
4	0,171	-0,004	0,181	0	-0,116	0
5	-0,013	0,137	0,119	-0,095	-0,056	0,077
6	-0,014	0,146	0,061	-0,09	0,053	-0,082

поверхностей наклонных брэгговских решеток световодов (1), (2). Численные значения деформаций $\varepsilon_{(k)ij}$ (табл. 1–6) световодов и искомых информационных передаточных коэффициентов $a'_{(k)mn}$ (табл. 7) оптоволоконного датчика (рис. 1, *а*) с учетом равенств:

$$a'_{(k)23}=a'_{(k)32},\ a'_{(k)13}=a'_{(k)31},\ a'_{(k)12}=a'_{(k)21}$$

находим из рассмотрения расчетной области «композит/встроенный датчик» (рис. 4) при шести простых случаях, в частности, трех осевых: ε^*_{11}, ε^*_{22}, ε^*_{33} и трех сдвиговых: $\gamma^*_{23}=2\varepsilon^*_{23}$, $\gamma^*_{13}=2\varepsilon^*_{13}$, $\gamma^*_{12}=2\varepsilon^*_{12}$ деформированиях $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ расчетной области в виде параллелепипеда. В табл. 1–7 случай k=0 соответствует центральному световоду датчика (см. рис. 1, *а*, рис.4) с традиционной поперечной решеткой, т.е. ненаклонной брэгговской. TFBGs-датчик в виде составной цилиндрической области «буферный слой/световоды» с радиусом световодов 0,4 мм, межцентренным расстоянием между световодами с гексагональной укладкой 0,9 мм, радиусом цилиндрического буферного слоя 2,8 мм расположен в центральной области параллелепипеда с ребрами: l_1=l_2=16,8 мм, l_3=27,2 мм, ориентированными вдоль соответствующих поперечных $r_{1,2,}$ и продольной r_3 координатных осей. Отметим, что на поля деформирования световодов и,

как результат, численные значения передаточных коэффициентов оптоволоконного TFBGs-датчика влияют не абсолютные, а относительные размеры структурных элементов расчетной области «композит/встроенный датчик». Выполняются условия идеального контакта – непрерывность векторов перемещений и напряжений на межфазных поверхностях. Изотропные упругие свойства световода были заданы через модуль Юнга $E_{(1)}$ = = 50 ГПа и коэффициент Пуассона $\nu_{(1)}$=0,25, для полимерного корпуса $E_{(2)}$ = 0,73 ГПа, $\nu_{(2)}$=0,46. Трансверсально-изотропные с осью симметрии r_3 упругие свойства параллелепипеда (стеклопластик) задавались через эффективные характеристики, в частности: поперечный и продольный модули Юнга: E_1^* = 10,017 ГПа, E_3^* = 31,217 ГПа, коэффициенты Пуассона: ν_{12}^* = 0,521, ν_{13}^* = 0,304, модули сдвига в поперечной G_{12}^* = 3,294 ГПа и продольной G_{13}^* = 3,581 ГПа плоскостях. Эти эффективные характеристики получены в обобщенном сингулярном приближении [35; 36] для трансверсально-изотропных упругих свойств однонаправленного волокнистого стеклопластика с объемной долей 0,6 ориентированных по оси r_3 волокон, когда модули Юнга и коэффициенты Пуассона изотропных упругих свойств эпоксидной матрицы 3 ГПа, 0,4 и стекловолокон 50 ГПа, 0,25 соответственно. Отметим, что в общем для анизотропных, в частности волокнистых, композитов эффективные коэффициенты Пуассона могут принимать численные значения < 0 или > 0,5 [36; 37].

Численное моделирование – расчет распределений деформационных полей (рис. 5; табл. 1–6) для расчетной представительной области «композит/встроенный датчик» (см. рис. 4, *а*) и нахождение численных значений (см. табл. 7) информационных передаточных коэффициентов $a'_{(k)mn}$ оптоволоконного датчика (см. рис. 1, *а*) осуществлено для различных случаев нагружений представительной области (см. рис. 4, *а*) с использованием многопроцессорного вычислительного комплекса Центра высокопроизводительных вычислительных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Расчетная область (см. рис. 4, *а*) была дискретизирована на $18 \cdot 10^6$ конечных элементов, из которых $12 \cdot 10^6$ – для области самого датчика с корпусом. Для решения систем линейный алгебраических уравнений использован итерационный решатель метода сопряженных градиентов JacobiConjugateGradient (JCG) solver, который позволил существенно сократить время счета в сравнении с решателем Sparsedirectequationsolver (SPARSE); время счета для базового варианта задачи составило около 10 ч для SPARSE и 6 ч для JCG. Осуществлена проверка сходимости результатов расчета, выявлено, что в пределах менее 1 % стабильность искомых численных значений достигается при числе N > 55 000 элементов дискретизации расчетной области.

Заключение

Разработаны математические модели встраиваемых оптоволоконных TFBGs-датчиков (см. рис. 1) с различно наклоненными брэгговскими решетками (см. рис. 2) для диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния внутри полимерных композитных конструкций (см. рис. 1, *а*); различные пространственные ориентации отражающих поверхностей для различных световодов были заданы (1), (2) через координаты некомпланарных нормалей $\mathbf{n}_k$ к этим поверхностям. Численное моделирование функционирования оптоволоконного TFBGs-датчика (см. рис. 1, *а*) осуществлено для расчетной области «композит/встроенный датчик» (см. рис. 4, *а*) в рамках линейной теории упругости. Представлены (см. рис. 5) цветовые эпюры распределений различных компонент ε_{ij} поля деформаций $\varepsilon(\mathbf{r})$ по серединному поперечному сечению расчетной области (см. рис. 4, *а*) при соответствующих простых случаях ее макродеформирования ε_{ij}^*, при этом численные значения осредненных по области каждого *k*-го световода компонент деформаций $\varepsilon'_{(k)ij}$ представлены в табл. 1–6. Далее значения компонент деформаций $\varepsilon'_{(k)ij}$ (см. табл. 1–6; рис. 4) использованы для вычисления (16) осевых деформаций $e'_{n(k)}$ вдоль некомпланарных векторов $\mathbf{n}_k$ и в результате найдены численные значения искомых (14) информационных передаточных коэффициентов $a'_{(k)mn}$ (см. табл. 7) оптоволоконного TFBGs-датчика на рис. 1, *а*, с учетом заданных (1), (2) ориентаций отражающих поверхностей наклонных брэгговских решеток световодов датчика. Таким образом, задача диагностирования сложного напряженно-деформированного состояния $\boldsymbol{\sigma}^*$, $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ элементарного макрообъема $d\mathbf{V}^*$ (см. рис. 1, *а*, рис. 4) внутри нагруженной термосиловыми воздействиями композитной конструкции в локальной окрестности встроенного в нее оптоволоконного TFBGs-датчика сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, например, (11), (12), относительно искомых шести независимых компонент: ε_{11}^*, ε_{22}^*, …, ε_{12}^* тензора макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ с использованием TFBGs-датчика с наличием (см. рис. 1, *b*) или (13) без (см. рис. 1, *а*) управляющего пьезоэлектрического кабеля по значениям информативных смещений $\Delta_{(k)}$ измеряемых спектров отражения $\overline{R}_{\varepsilon(k)}$ световодов.

Библиографический список

1. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

2. Качура, С.М. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) / С.М. Качура, В.И. Постнов // Труды ВИАМ. – 2019. – № 5. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61

3. Волоконные брэгговские решетки и мультипликативные датчики на их основе: учебное пособие для вузов / А.А. Кузнецов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, В.И. Артемьев; под ред. Морозова О.Г. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. – 108 с.

4. Сорокин, К.В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (Обзор) / К.В. Сорокин, В.В. Мурашов // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 3 (36). – С. 90–94.

5. Уорден, К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции / К. Уорден. – М.: Техносфера, 2006. – 223 с.

6. Троицкий, В.А. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов / В.А. Троицкий, М.Н. Карманов, Н.В. Троицкая // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 29–33.

7. Alvarez-Montoya, J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition / J. Alvarez-Montoya, A. Carvajal-Castrillón, J. Sierra-Pérez // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 136. – P. 1–26. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106526

8. Возможности сенсорных систем и интеллектуальных ПКМ на их основе / М.Ю. Федотов, К.В. Сорокин, В.А. Гончаров, А.М. Шиенок, П.В. Зеленский // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2013. – №2. – С. 18–23.

9. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е.Н. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин, М.Ю. Федотов, Е.М. Дианов, С.А. Васильев, О.И. Медведков // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2010. – № 3. – С. 10-15.

10. Наймушин, И.Г. Численный анализ деформационных процессов в оптоволоконном датчике / И.Г. Наймушин, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 1. – С. 104–116.*

11. Analysis of reability of strain measurements made with the fiber bragg grating sensor rosettes embedded in a polymer composite material / V. Matveenko, N. Kosheleva, G. Serovaev, A. Fedorov // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 5050–5065. DOI: 10.3390/s21155050

12. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material / A.Y. Fedorov, N.A. Kosheleva, V.P. Matveenko, G.S. Serovaev // Composite Structures. – 2020. – Vol. 239. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111844

13. Matveenko, V. Distributed strain measurements based on rayleigh scattering in the presence of fiber bragg gratings in an optical fiber / V. Matveenko, G. Serovaev // Photonics [Electronic resource]. – 2023. – Vol. 10, no. 8. – P. 1–11. DOI: 10.3390/photonics10080868

14. Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки / В.А. Анискович, О.Н. Будадин, С.О. Козельская, Ю.Г. Кутюрин, А.Н. Рыков, А.А. Склезнев, П.И. Гнусин, О.А. Юранёв // Контроль и диагностика. – 2022. – № 2. – С. 16–23. DOI: 10.14489/td.2022.02.pp.016-023

15. Wali, A.S. Neural network based smart damage deduction using a fiber optic sensor for aluminium 6063 cantilever beam / A.S. Wali, A. Tyagi // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 21. – P. 1412–1416. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.181

16. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors / P. Motwani, N. Perogamvros, S. Taylor, M. Sonebi, A. Laskar, A. Murphy // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 303. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.sna.2020.111833

17. Паньков, А.А. Пьезокомпозиты и датчики. Часть 3. Пьезолюминесцентные датчики, покрытия и актюаторы / А.А. Паньков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун–та, 2024. – 347 с.

18. Elastomer-embedded multiplexed optical fiber sensor system for multiplane shape reconstruction / A. Leal-Junior, L. Macedo, L. Avellar, A. Frizera // Sensors (Basel). – 2023. – Vol. 23(2). – P 994. DOI:10.3390/s23020994.

19. Экспериментальное исследование и моделирование волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом / В.А. Новикова, С.В. Варжель, Е.А. Лосева, А.А. Дмитриев // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 6. – С. 36–44. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-06-36-44

20. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method / A.A. Dmitriev, A.I. Gribaev, S.V. Varzhel, K.A. Konnov, E.A. Motorin // Optical Fiber Technology. – 2021. – Vol. 63. – P. 102508. DOI: 10.1016/j.yofte.2021.102508

21. Recent achievements on grating fabrications in polymer optical fibers with photosensitive dopants: A Review / J. Jiang, N. Zhang, R. Min, X. Cheng, H. Qu, X. Hu // Polymers (Basel). – 2022. – Vol. 14(2). – P. 273. DOI: 10.3390/polym14020273

22. А.с. Волоконно-оптический датчик сложного напряженно-деформированного состояния / Паньков А.А.; заявка № 2025101565 от 27.01.2025. Решение о выдаче патента 03.06.2025.

23. Kipriksiz, S.E. Tilted fiber Bragg grating design for a simultaneous measurement of temperature and strain / S.E. Kipriksiz, M. Yucel // Optical and Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 53(6). DOI: 10.1007/s11082-020-02609-w

24. Compact Optical Fiber 3D Shape Sensor Based on a Pair of Orthogonal Tilted Fiber Bragg Gratings / D. Feng, W. Zhou, X. Qiao, J. Albert // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – P. 17415. DOI: 10.1038/srep17415

25. Fabrication and Characterization of Line-by-Line Inscribed Tilted Fiber Bragg Gratings Using Femtosecond Laser / H. Li, X. Zhao, B. Rao, M. Wang, B. Wu, Z. Wang // Sensors (Basel). – 2021. – Vol. 21(18). – P. 6237. DOI: 10.3390/s21186237

26. Polarimetric multi-mode tilted fiber grating sensors / T. Guo, F. Liu, B.O. Guan, J. Albert // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(6). – P. 7330-6. DOI: 10.1364/OE.22.007330.

27. Localized tilted fiber Bragg gratings induced by femtosecond laser line-by-line inscription / B. Liu, K. Yang, C. Liao, Z. Cai, Y. Liu, B. Sun, Y. Wang // Optics Letters. – 2021. – Vol. 46(9). – P. 2204–2207. DOI: 10.1364/OL.424581.

28. Патент RU № 2643692. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А., опубл.: 05.02.2018 Бюл. № 4; заявка № 2017111405 от 04.04.2017.

29. Pan'kov, A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields / A.A. Pan'kov // Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – Vol. 288. – P. 171–176.

30. Патент RU № 2799986 Волоконно-оптический датчик механических напряжений / Паньков А.А., опубл.: 14.07.2023 Бюл. № 20, заявка № 2022129729 от 16.11.2022.

31. Patent US № 4629925. Piezoelectric coaxial cable / M. Booth, R.J. Penneck, Application Date: 20.11.1984. Publication Date: 16.12.1986. 8 p.

32. Patent US № 4609845. Stretched piezoeleci'ric polymer coaxial cable / P.L. Soni, N.R. Farrar. Application Date: 06.07.1984. Publication Date: 02.09.1986. 7 p.

33. Othonos, A. Fiber Bragg gratings / A. Othonos // Rev. Sci. Instrum. – 1997. – Vol. 68(12). – P. 4309–4341.

34. Фотоника и оптоинформатика. Волоконные брэгговские решётки: учеб.-метод. пособие / И.С. Азанова, И.Л. Вольхин, А.С. Луценко, Н.А. Мальков, Д.И. Шевцов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. – 94 с.

35. Шермергор, Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред / Т.Д. Шермергор. – М.: Наука, 1976. – 399 с.

36. Паньков, А.А. Пьезокомпозиты и датчики: монография: в 3 ч. – Ч. 1.: Статистическая механика пьезокомпозитов / А.А. Паньков. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2022. – 234 с.

37. Бахвалов, Н.С. Осреднение процессов в периодических средах / Н.С. Бахвалов, Г.П. Панасенко. – М.: Наука, 1984. – 352 с.

References

1. Frajden Dzh., Sovremennye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Reference book]. M.: Tekhnosfera, 2005, 592 p.

2. Kachura S.M., Postnov V.I. Perspektivnye optovolokonnye datchiki i ih primenenie (obzor) [Promising fiber optic sensors and their application (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5. https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61

3. Kuznecov A.A., Sahabutdinov A.ZH., Nureev I.I., Artem'ev V.I. Volokonnye breggovskie reshetki i mul'tiplikativnye datchiki na ih osnove: uchebnoe posobie dlya VUZov [Fiber Bragg gratings and multiplicative sensors based on them: a textbook for universities], pod red. Morozova O.G. Kazan': Izd-vo KNITU-KAI, 2020, 108 p.

4. Sorokin K.V., Murashov V.V. Mirovye tendencii razvitiya raspredelennyh volokonno-opticheskih sensornyh sistem (Obzor) [Global trends in development of the distributed fiber-optical sensor systems (Review)]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 3(36), pp. 90-94.

5. Uorden K. Novye intellektual'nye materialy i konstrukcii [New intellectual materials and designs]. M.: Tekhnosfera, 2006, 223 p.

6. Troickij V.A., Karmanov M.N., Troickaya N.V. Nerazrushayushchij kontrol' kachestva kompozicionnyh materialov [Nondestructive quality control of composite materials]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchij kontrol*, 2014, no. 3, pp. 29-33.

7. Alvarez-Montoya J., Carvajal-Castrillón A., Sierra-Pérez J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 136, pp. 1-26. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106526

8. Fedotov M.YU., Sorokin K.V., Goncharov V.A., SHienok A.M., Zelenskij P.V. Vozmozhnosti sensornyh sistem i intellektual'nyh PKM na ih osnove [Possibilities of sensor systems and intellectual PCM on their basis]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*, 2013, no. 2, pp. 18-23.

9. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.YU., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I. Primenenie opticheskogo volokna v kachestve datchikov deformacii v polimernyh kompozicionnyh materialah [Use of optical fiber as deformation sensors in polymeric composite materials]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*, 2010, no. 3, pp. 10-15.

10. Najmushin I.G., Trufanov N.A., SHardakov I.N. Chislennyj analiz deformacionnyh processov v optovolokonnom datchike [The numerical analysis of deformation processes in the fiber-optic sensor]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2012, no. 1, pp. 104-116.

11. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. Analysis of Reability of Strain Measurements Made with the Fiber Bragg Grating Sensor Rosettes Embedded in a Polymer Composite Material. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 5050-5065. https://doi.org/10.3390/s21155050

12. 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, vol. 239, pp. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111844

13. Matveenko V., Serovaev G. Distributed Strain Measurements Based on Rayleigh Scattering in the Presence of Fiber Bragg Gratings in an Optical Fiber. *Photonics [Electronic resource]*, 2023, vol. 10, no. 8, pp. 1-11. https://doi.org/10.3390/photonics10080868

14. Aniskovich V.A., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O., Kutyurin YU.G., Rykov A.N., Skleznev A.A., Gnusin P.I., YUranyov O.A. Integrirovanie volokonno-opticheskih datchikov v kompozitnyj cilindricheskij korpus iz ugleplastika, izgotovlennyj sposobom nepreryvnoj namotki [Integration of fiber-optic sensors into a composite cylindrical housing made of carbon fiber, made by continuous winding]. *Kontrol' i diagnostika*, 2022, no. 2, pp. 16-23. https://doi.org/10.14489/td.2022.02.pp.016-023

15. Wali A.S., Tyagi A. Neural network based smart damage deduction using a fiber optic sensor for aluminium 6063 cantilever beam. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 21, pp. 1412-1416. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.181

16. Motwani P., Perogamvros N., Taylor S., Sonebi M., Laskar A., Murphy A. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, vol. 303, pp. 1-13. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111833

17. Pan'kov A.A. P'ezokompozity i datchiki: monografiya v 3-h chastyah / CHast' 3. P'ezolyuminescentnye datchiki, pokrytiya i aktyuatory [Piezocomposites and sensors: monograph in 3 parts / Part 3. Piezoluminescent sensors, coatings and actuators]. Perm: Perm National Research University Publ., 2024, 347 p.

18. Leal-Junior A., Macedo L., Avellar L., Frizera A. Elastomer-Embedded Multiplexed Optical Fiber Sensor System for Multiplane Shape Reconstruction, *Sensors (Basel)*, 2023, 23(2):994. https://doi.org/10.3390/s23020994.

19. Novikova V.A., Varzhel' S.V., Loseva E.A., Dmitriev A.A. Eksperimental'noe issledovanie i modelirovanie volokonnyh breggovskih reshetok s fazovym sdvigom [Experimental study and modeling of fiber Bragg lattices with phase shift]. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 6, pp. 36-44. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-06-36-44

20. Dmitriev A.A., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Motorin E.A. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method, *Optical Fiber Technology*, 2021, vol. 63, pp. 102508. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102508

21. Jiang J., Zhang N., Min R., Cheng X., Qu H., Hu X. Recent Achievements on Grating Fabrications in Polymer Optical Fibers with Photosensitive Dopants: A Review, *Polymers (Basel)*, 2022, 14(2):273. https://doi.org/10.3390/polym14020273

22. A.s. Volokonno-opticheskij datchik slozhnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Fiber-optic complex stress-strain state sensor]. Pan'kov A.A., zayavka no. 2025101565 ot 27.01.2025 g. Date of Decision to grant patent: 03.06.2025.

23. Kipriksiz S.E., Yucel M. Tilted fiber Bragg grating design for a simultaneous measurement of temperature and strain, *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(6). https://doi.org/10.1007/s11082-020-02609-w

24. Feng D., Zhou W., Qiao X., Albert J. Compact Optical Fiber 3D Shape Sensor Based on a Pair of Orthogonal Tilted Fiber Bragg Gratings, *Scientific Reports*, 2015, 5:17415. https://doi.org/10.1038/srep17415

25. Li H., Zhao X., Rao B., Wang M., Wu B., Wang Z. Fabrication and Characterization of Line-by-Line Inscribed Tilted Fiber Bragg Gratings Using Femtosecond Laser, *Sensors (Basel)*, 2021, 21(18):6237. https://doi.org/10.3390/s21186237.

26. Guo T., Liu F., Guan B.O., Albert J. Polarimetric multimode tilted fiber grating sensors, *Optics Express*, 2014, 22(6):7330-6. https://doi.org/10.1364/OE.22.007330.

27. Liu B., Yang K., Liao C., Cai Z., Liu Y., Sun B., Wang Y. Localized tilted fiber Bragg gratings induced by femtosecond laser line-by-line inscription, *Optics Letters*, 2021, 46(9):2204-2207. https://doi.org/10.1364/OL.424581.

28. Patent RU 2643692. Volokonno-opticheskij datchik ob"emnogo napryazhennogo sostoyaniya [Fiber optic sensor of a volume stressed state]. Pan'kov A.A., opubl.: 05.02.2018 Byul. № 4; zayavka no. 2017111405 ot 04.04.2017 g.

29. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 288, pp. 171-176.

30. Patent RU 2799986. Volokonno-opticheskij datchik mekhanicheskih napryazhenij [Fiber Optic Stress Sensor]. Pan'kov A.A., opubl.: 14.07.2023 Byul. № 20; zayavka no. 2022129729 ot 16.11.2022 g.

31. Patent US 4629925. Piezoelectric coaxial cable / M. Booth, R.J. Penneck, Application Date: 20.11.1984. Publication Date: 16.12.1986. 8 p. https://patents.google.com/patent/US4629925A/en

32. Patent US 4609845. Stretched piezoeleci'ric polymer coaxial cable / P.L. Soni, N.R. Farrar. Application Date: 06.07.1984. Publication Date: 02.09.1986. 7 p. https://insight.rpxcorp.com/patent/US4609845A

33. Othonos A. Fiber Bragg gratings, *Rev. Sci. Instrum*., 1997, 68(12), pp. 4309-4341.

34. Azanova I.S., Vol'hin I.L., Lucenko A.S., Mal'kov N.A., SHevcov D.I. Fotonika i optoinformatika. Volokonnye breggovskie reshyotki: ucheb.-metod. posobie [Photonics and optoinformatics. Fiber Bragg gratings]. Perm: Perm National Research University Publ., 2023, 94 p.

35. Shermergor T.D. Teoriya uprugosti mikroneodnorodnyh sred [Theory of elasticity of micro heterogeneous media]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 399 p.

36. Pan'kov A.A. P'ezokompozity i datchiki: monografiya v 3-h chastyah / CHast' 2. Piroelektromagnitnye effekty kompozitov [Piezocomposites and sensors: monograph in 3 parts / Part 2. Pyroelectromagnetic effects of composites]. Perm: Perm National Research University Publ., 2023, 211 p.

37. Bahvalov N.S., Panasenko G.P. Osrednenie processov v periodicheskih sredah [Averaging processes in periodic media]. Moscow: Nauka Publ., 1984, 352 p.

Финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Пермского края и Российского научного фонда, проект № 24-21-2026.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Funding. The work was carried out with the financial support of the Perm Territory and the Russian Science Foundation, project No. 24-21-2026.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

The contribution of the author is 100 %.