

Паньков А.А., Писарев П.В. Численное моделирование электроупругих полей в поверхностном пьезоэлектролюминесцентном оптоволоконном датчике для диагностики деформирования композитных пластин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 64-77. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.06

Pan'kov A.A., Pisarev P.V. Numerical modeling of electroelastic fields in the surface piezoelectric luminescent optical fiber sensor to diagnose deformation of composite plates. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 64-77. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.06



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.06

УДК 539.3; 531.787.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ПОЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ ОПТОВОЛОКОННОМ ДАТЧИКЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН

А.А. Паньков, П.В. Писарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 апреля 2020 г.
Принята: 12 июня 2020 г.
Опубликована: 30 июня 2020 г.

Ключевые слова:

пьезоэлектروупругость, механолюминесцентный эффект, оптоволоконно, поверхностный датчик, композит, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Разработана трехмерная численная модель функционирования пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика, закрепленного на поверхности фрагмента композитной пластины. Расчетная область датчика – оптоволоконно с двумя концентрическими оболочками из 6 секторов электролюминесцентного и пьезоэлектрического материалов, два управляющих электрода на межфазных поверхностях: «оптоволоконно/электролюминофор» и «пьезоэлектрик/корпус». Корпус выполнен в виде полуэллиптической цилиндрической полимерной оболочки, прямоугольное основание которой закреплено на поверхности стеклопластиковой пластины. В секторах пьезоэлектрической оболочки направления поляризации трансверсально-изотропного полимерного пьезоэлектрика PVDF различны и некомпланарны для любых трех секторов. Деформирование пластины обуславливает деформирование закрепленного на ее поверхности датчика, возникновение в нем информативных пьезоэлектрических полей и, как следствие, появление информативных свечений электролюминесцентных элементов. Искомая информация о сложном деформированном состоянии композитной пластины по длине датчика находится по результатам цифровой обработки интегральных интенсивностей полихромных световых сигналов на выходе из оптоволоконка. Представлены новые численные результаты моделирования распределений неоднородных электроупругих полей в многофазном объеме датчика, окружающем его корпус и внутри фрагмента композитной пластины при простых случаях электрического и механического нагружений. Нагружения системы «датчик – корпус – пластина» осуществлены управляющим электрическим напряжением на электродах датчика и механическим деформированием пластины: растяжениями вдоль поперечной и продольной осей, закручиваниями вокруг данных осей и изгибами в поперечной и продольной плоскостях. Определены численные значения управляющих и информативных передаточных коэффициентов пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика, позволяющие выполнять достоверную и высокоточную диагностику сложного деформирования композитных пластин и осуществлять проектирование датчиков данного типа.

© ПНИПУ

© Паньков Андрей Анатольевич – д.ф.-м.н., доц., e-mail: a_a_pankov@mail.ru, ID: [0000-0001-8477-5206](https://orcid.org/0000-0001-8477-5206).
Писарев Павел Викторович – к.т.н., доц., e-mail: pisarev@pstu.ru, ID: [0000-0001-5103-4815](https://orcid.org/0000-0001-5103-4815).

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: a_a_pankov@mail.ru, ID: [0000-0001-8477-5206](https://orcid.org/0000-0001-8477-5206).

Pavel V. Pisarev – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pisarev@pstu.ru, ID: [0000-0001-5103-4815](https://orcid.org/0000-0001-5103-4815).



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)

NUMERICAL MODELING OF ELECTROELASTIC FIELDS IN THE SURFACE PIEZOELECTRIC LUMINESCENT OPTICAL FIBER SENSOR TO DIAGNOSE DEFORMATION OF COMPOSITE PLATES

A.A. Pan'kov, P.V. Pisarev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 April 2020
Accepted: 12 June 2020
Published: 30 June 2020

Keywords:

piezoelectroelasticity,
mechanical and luminescent effect,
optical fiber, surface sensor,
composite, numerical modeling.

ABSTRACT

We developed a three-dimensional numerical model of a piezoelectric luminescent optical fiber sensor fixed on a composite's plate. The computational region of the sensor is the optical fiber with two concentric (with 6 sectors) shells of electroluminescent and piezoelectric materials, two control electrodes on interface surfaces, such as optical fiber-electroluminescent and piezoelectric-cover. The external sensor's cover is made in the form of a semi-elliptic cylindrical polymer shell, which rectangular base is fixed on the surface of the fiberglass plate. In the piezoelectric shell sectors, the polarization directions of the PVDF transversal-isotropic polymer piezoelectric are different and non-planar for any three sectors. Deformation of the plate causes deformation of the sensor fixed on its surface, as well as the occurrence of informative piezoelectric fields in it, thus the occurrence of informative glows of electroluminescent elements. As a result, we find the requested information about the combined deformed state of the composite plate along the length of the sensor based on the digital processing of the integral intensities of the polychrome light signals at the output of the optical fiber. In simple cases of electric and mechanical loads, we present new numerical results of simulating the distribution of non-uniform electroelastic fields in the sensor multiphase volume, the sensor's external cover and inside fragment of the composite plate. Loading of the sensor-covering-plate system is performed by controlling electric voltage on the sensor's electrodes and the plate's mechanical deformation by stretching along the transverse and longitudinal axes, as well as by twisting around these axes and bending in transverse and longitudinal planes. Numerical values of the control and informative transfer coefficients of the piezoelectric luminescent optical fiber sensor are determined, which makes it possible to perform a reliable and high-precision diagnostics of complex deformations of the composite plates and design sensors of this type.

© PNRPU

Введение

Высокое качество и надежность композитных конструкций аэрокосмического назначения обеспечивается применением современных эффективных методов неразрушающего контроля геометрических и физико-механических характеристик состояния и свойств на различных структурных уровнях конструкций, в частности, мониторинга возникающих в них существенно неоднородных сложных деформационных и температурных полей, состояния структурных элементов и их межфазных границ, индикации возникновения и идентификации положения, формы и размеров разнообразных технологических дефектов и эксплуатационных микрповреждений [1–12]. Системы диагностики физико-механических полей в композитных конструкциях подразделяются на «внешние», расположенные вне или на поверхности конструкций, и «внутренние», предварительно встроенные в диагностируемые области конструкций на этапе их изготовления. Диагностика появления и идентификации дефектов в композитных конструкциях может проводиться опосредованно через мониторинг и анализ физических и механических деформационных полей внутри конструкций, выявление и пространственную локацию технологических дефектов и/или зон концентраций напряжений с целью предотвращения или контроля разрушения элементов структу-

ры композита. Широкое распространение в дефектоскопии конструкций получили универсальные ультразвуковые методы контроля, которые позволяют определять пористость, плотность, содержание матрицы и наполнителя, степень отверждения матрицы, упругие и прочностные свойства внутри полимерных композитных конструкций из угле-, органо- и стеклопластиков [13]. В частности, метод ультразвуковых фазированных решеток [14] и ультразвуковой резонансный метод позволяют диагностировать размеры, взаимное расположение и глубину залегания дефектов от поверхности конструкции по результатам измерения резонансной частоты преобразователя с учетом влияния на чувствительность метода величины скорости перемещения преобразователя по поверхности диагностируемой конструкции [15]. Результаты физического и математического моделирования дефектов в композитных конструкциях даны в [16, 17], где проведены экспериментальные исследования на образцах из углепластика с искусственными дефектами, имитирующими расслоения различного размера и ударные повреждения, даны рекомендации по контролю качества таких материалов [16] и проведен анализ трехуровневых дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства; показана необходимость разработки математических моделей идентификации наблюдаемых дефектов [17].

Методы диагностики деформационных полей в приповерхностных областях композитных конструкций включают в себя, в частности, тензометрический метод дельта-розеток для определения плоских деформаций локальных участков поверхности исследуемой конструкции [18], методы диагностических покрытий, в качестве которых используются, например:

- диагностическая поверхностная сетка в виде системы пересекающихся окружностей различного диаметра, которая закрепляется на поверхности конструкции, и в результате обработки ее фотоизображений до и после деформирования конструкции делаются выводы о характере и величине деформаций на рассматриваемом участке поверхности конструкции [19];

- двухслойное диагностическое покрытие [20] из слюдопигмента и защитного слоя полимерного материала, которое наносят на участок поверхности конструкции с вероятным возникновением дефекта; появление и развитие дефектов в приповерхностном слое конструкции определяют визуально по изменению оптических свойств диагностического покрытия, и чем меньше размеры частиц слюдопигмента, тем меньший размер повреждений может быть диагностирован данным способом;

- двухслойное диагностическое покрытие [21], в котором внутренний графитизированный слой из полиакрилонитрила с углеродными волокнами реагирует изменением своего электрического сопротивления на изменение напряженно-деформированного состояния, а внешний цветовой индикаторный слой из жидкокристаллического полимера способен изменять свой цвет в зависимости от величины проходящего через него тока; к внутреннему графитизированному слою датчика подсоединяют источник тока и определяют напряженно-деформируемое состояние участка диагностируемой конструкции по результатам измерения цветности индикаторного слоя диагностического покрытия;

- диагностическое покрытие [22] из полимерного материала с капсулами красящего вещества наносят на участок поверхности вероятного возникновения дефекта, и появление и/или развитие дефекта на этом участке обуславливает изменение цвета покрытия из-за разрывов капсул с краской;

- диагностическое флуоресцентное покрытие [23] из эластомера с распределенной внутри него системой флуоресцентных частиц, которые обуславливают оптический отклик на деформирование покрытия в виде спектра испускания полимера. Голографические интерференционные методы [24, 25] позволяют определять поля микросмещений точек и далее – микродеформаций поверхности объекта; повышение разрешающей способности и расширение функциональных возможностей этих методов связано с прогрессом развития цифровых устройств фотоэлектрической записи оптических изображений и развитием программных средств их обработки.

Для диагностирования деформированного состояния в приповерхностных областях конструкции находят

применение различные маркеры, внедренные в исследуемый объект. В частности, тактильный датчик поверхностного типа [26] диагностирует геометрическую форму поверхности объекта, вступившей в контакт с прозрачным гибким корпусом датчика, опосредованно, через определение сложной объемной неоднородной деформации корпуса посредством обработки фотоизображений расположенных в нем окрашенных маркеров; плотность расположения цветных маркеров по различным монохромным слоям уменьшается от поверхности контакта по мере приближения к фотокамере для уменьшения теневых зон. Диагностирование поверхностных деформаций конструкций из немагнитных материалов возможно проводить с использованием [27] магнитных маркеров, внедренных в приповерхностный слой конструкции, через измерения внешними датчиками информативных изменений магнитного поля вблизи поверхности с последующим решением обратных задач для нахождения смещений маркеров и искомым поверхностных деформаций исследуемого участка конструкции. Традиционные магнитные методы в основном применяются для диагностики деформирования изделий из ферромагнитных материалов, в частности: метод измерения шумов Баркгаузена основан на связи между намагничиванием ферромагнетика и величиной механических напряжений, метод магнитной анизотропии – на связи анизотропии магнитных свойств с деформацией и метод собственных магнитных полей – на эффекте магнитострикции ферромагнетика [28]. Эффект фотоупругости использован, в частности, в тензометрическом датчике поверхностных деформаций [29]; датчик имеет форму цилиндра и закрепляется торцевым сечением на поверхности контролируемой конструкции, деформирование которой обуславливает деформирование фотоупругого элемента внутри датчика и возникновение дополнительной разности фаз между взаимно перпендикулярными компонентами поляризации луча, проходящего сквозь фотоупругий элемент и, как следствие, изменение электрического сигнала на выходе фотоприемника; сигнал регистрируется, обрабатывается и выводится на индикаторную панель.

Поверхностные оптоволоконные датчики с брэгговскими решетками [30–32] присоединяются к внешним поверхностям исследуемых деформируемых конструкций с обеспечением дополнительной термокомпенсации или термоизоляции датчика на участке контакта с поверхностью конструкции. Возможности численного моделирования функционирования датчика с брэгговскими решетками в пакете ANSYS продемонстрированы в [32], где представлены результаты расчета деформационных полей в системе «подложка – клей – оптоволоконный датчик» по линейной теории термоупругости. Различные сенсорные сети и интеллектуальные композиционные материалы рассмотрены в [33–36], при этом в [34] даны основные типы сенсорных элементов, проанализированы их преимущества

и недостатки с точки зрения интеграции в структуру полимерных композиционных материалов и показаны возможности применения интеллектуальных композиционных материалов с интегрированными волоконно-оптическими сенсорами с брэгговскими решетками в качестве датчиков деформации. Сеть из оптоволоконных брэгговских решеток [34–36] может размещаться в приповерхностном слое композитной конструкции в процессе изготовления, что позволяет определять величины и локации деформаций в различных локальных областях конструкции за счет использования массивов брэгговских решеток на прямой и поперечной оптоволоконных линиях. Тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем рассмотрены в обзорной работе [37], где исследованы направления развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем и способы обработки диагностической информации.

Перспективными являются датчики на основе «механолюминесцентного эффекта» – светоотдачи при механическом воздействии, который может проявляться как для однородных [38], так и для композитных с пьезоэлектрической и электролюминесцентной фазами [39, 40] материалов. Для визуализации и мониторинга динамической вибрационной нагрузки механолюминесцентный эффект использован в конструкции композитного датчика, в котором механолюминесцентный эффект появляется в результате связи пьезоэлектрического и электролюминесцентного эффектов у различных фаз и интенсивность свечения зависит от величины и частоты вибрации [40]. В [41–43] предложены новые пьезоэлектролюминесцентные оптоволоконные датчики [44], внедряемые (в частности, на этапе производства композитной конструкции) внутрь [41, 42] или устанавливаемые на внешней поверхности [43] диагностируемой области, для уточненного мониторинга давления [41, 45] и сложного объемного напряженно-деформированного состояния внутри композитных конструкций [42, 46, 47] с использованием алгоритмов [45, 46] обработки приемником-анализатором интенсивностей интегральных оптических сигналов на выходе из оптоволоконного датчика. Информативные световые сигналы возникают на локальных участках датчика в силу механолюминесцентного эффекта, обусловленного взаимодействием пьезоэлектрического и электролюминесцентного элементов датчика, и передаются по оптоволокну к приемнику-анализатору; наличие управляющих электродов позволяет [45, 46] диагностировать локации неоднородностей температурных и деформационных полей в композитных конструкциях.

Цель – разработка трехмерной численной модели в ANSYS функционирования пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного поверхностного датчика [43], закрепленного на поверхности композитной пластины, численный анализ существенно неоднородных связанных электроупругих полей в системе «пластина – датчик в корпусе» и нахождение численных значений

управляющих и информативных передаточных коэффициентов датчика для диагностирования сложного пространственного деформирования композитных пластин.

1. Математическая модель датчика

Датчик (рис. 1) [43, 44] предназначен для диагностирования распределения (по длине датчика) характеристик сложного пространственного напряженно-деформированного состояния, в частности: результирующих осевых усилий N_1 , N_3 , крутящих M_{11} , M_{33} и изгибных M_{13} , M_{31} моментов в сечениях пластин и оболочек по результатам обработки приемником-анализатором интенсивностей интегральных световых сигналов I_1, \dots, I_6 на выходе из оптоволоконной 1 датчика. Датчик представляет в целом однородное по своей длине «слоистое волокно», состоящее из центрального оптоволоконной 1 с электролюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 коаксиальными слоями, при этом оптоволоконная 1 и электролюминесцентный слой 2 разделены «внутренним» светопрозрачным или перфорированным управляющим электродом 4 , а на поверхности пьезоэлектрического слоя 3 расположен «внешний» управляющий электрод 5 . Датчик размещен внутри корпуса 6 , выполненного, например, в виде внешней однородной полуэллиптической цилиндрической защитной оболочки, посредством которой происходит передача на чувствительные пьезоэлектрические элементы 3 датчика информативных деформационных полей от диагностируемого сложного пространственного напряженно-деформированного состояния композитной пластины 7 через границу механического контакта пластины 7 с основанием корпуса 6 .

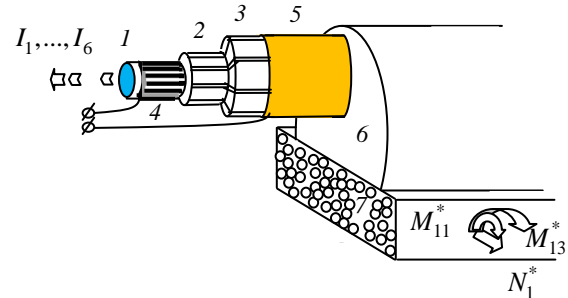


Рис. 1. Поверхностный датчик пространственного деформирования пластин и оболочек

Fig. 1. The superficial sensor of 3D deformation of plates and shells

Электролюминесцентный 2 и пьезоэлектрический 3 слои разделены общими для обоих слоев радиально-продольными границами на геометрически равные n «измерительные элементы» – цилиндрические двухслойные секторы, число которых равно числу n диагностируемых характеристик деформированного состоя-

ния пластины, в частности $n = 6$ (см. рис. 1). В измерительных элементах направления \mathbf{d}_j пространственных поляризации пьезоэлектрических фаз (пьезоэлементов) и частоты светоотдач электролюминесцентных фаз различны по всем n секторам; направления поляризации пьезоэлементов для случая $n \geq 3$ задаются из условия некомпланарности направлений поляризации для произвольных трех секторов датчика, $j = \overline{1, n}$. Пьезоэлектрические элементы могут представлять собой различные или один и тот же пьезоэлектрик, например трансверсально-изотропный полимерный материал PVDF, но с различными пространственными направлениями \mathbf{d}_j поляризации по секторам (рис. 2) [46, 47]; направление поляризации является осью симметрии трансверсально-изотропного пьезоэлектрика PVDF. Координаты $d_{(j)i}$ единичных направляющих векторов \mathbf{d}_j заданы в осях $r_{1,2,3}$ декартовой системы координат в виде $d_{(j)1} = \cos \varphi_j \sin \theta_j$, $d_{(j)2} = \sin \varphi_j \sin \theta_j$, $d_{(j)3} = \cos \theta_j$ через значения ориентационных углов φ_j, θ_j сферической системы координат: $\varphi_1 = 0$, $\varphi_{2,6} = \pm \pi/3$, $\varphi_{3,5} = \pm 2\pi/3$, $\varphi_4 = \pi$, $\theta_1 = 0$, $\theta_{2,3} = \pi/3$, $\theta_{3,5} = \pi/6$, $\theta_4 = \pi/2$ (см. рис. 2), координатная ось $z = r_3$ совмещена с осью оптоволоконна. На рис. 2, а даны расположения контрольных точек (•) для снятия электрических потенциалов $\varphi_{1, \dots, 6}$ при нахождении численных значений передаточных коэффициентов датчика.

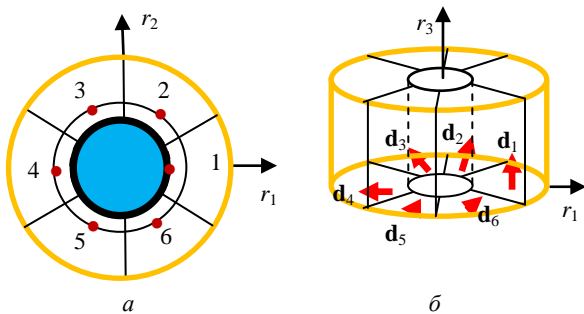


Рис. 2. Расположения контрольных точек (•), нумерация (а) и направления поляризации \mathbf{d}_j (б) пьезоэлектрических секторов

Fig. 2. Control points, numbering (a) and of polarization directions \mathbf{d}_j (b) of piezoelectric sectors

Для произвольного с продольной координатой r_3 поперечного сечения датчика результирующие электрические напряжения $U_{\text{люм}(j)}$ на электролюминесцентном элементе в j -м круговом секторе (см. рис. 1) представим линейным разложением

$$U_{\text{люм}(j)} = \sum_{k=1}^n a_{\varepsilon(j,k)} \varepsilon_k^* + a_{U(j)} U_{\text{упр}} \quad (1)$$

по заданным значениям управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ и искомым компонентам ε_k^* обобщенных макродеформаций ε^* локального элементарного участка композитной пластины с этой координатой r_3 , $j, k = \overline{1, n}$. Управляющие $a_{U(j)}$ и информативные $a_{\varepsilon(j,k)}$ передаточные коэффициенты датчика (1) зависят от его геометрических и электроупругих характеристик, ориентаций направлений поляризации \mathbf{d}_j в секторах пьезоэлектрического слоя и, дополнительно, от эффективных анизотропных электроупругих свойств композитной пластины с учетом ориентаций главных осей анизотропии пластины относительно продольной оси датчика. Информативные передаточные коэффициенты датчика $a_{\varepsilon(j)}$ определяются экспериментально или в результате численного моделирования для простых случаев макродеформирования пластины (т.е. с одной ненулевой компонентой ε^*) с прикрепленным к ней датчиком. При этом в каждом таком «простом» на макроуровне случае в объеме датчика реализуется существенно неоднородное сложное напряженно-деформированное состояние, обусловленное в том числе различными пространственными ориентациями главных осей анизотропии (направлениями поляризации \mathbf{d}_j) для различных локальных участков (шести круговых секторов) пьезоэлектролюминесцентного слоя (см. рис. 2, б) датчика.

Буферная прослойка корпуса б (см. рис. 1) обеспечивает чувствительность измерительных пьезоэлектрических элементов з датчика лишь к макроскопической или «плавной» составляющей ε^* стохастических быстроосциллирующих полей деформирования композитной пластины [48, 49], что исключает «паразитное влияние» на результаты измерений случайных пульсаций, обусловленных стохастическим характером композитной структуры пластины в окрестности участка контакта пластины 7 с основанием корпуса б датчика. Эффект «фильтрации» буферной прослойкой показаний датчика от пульсаций, вызванных композитной структурой пластины, обусловлен «принципом локальности» [49], согласно которому область возмущений деформационных полей (в окрестности неоднородности) имеет локальный характер. Предполагается, что характерный размер неоднородностей, в частности диаметр поперечных сечений волокон, в композитной пластине значительно меньше толщины пластины и в несколько раз (три или более) меньше толщины, ширины буферного слоя датчика. Оптимизация характерных размеров буферного слоя для различных типов структур через оценку и минимизацию паразитного влияния на показания датчика вариаций расположения элементов структуры (волокон) в композитной пластине может быть осуществлена на основе численного моделирования с использованием расчетной схемы системы «пластина – датчик», в кото-

рой область композитной пластины представлена гетерогенной кусочно-однородной областью типа «матрица – волокна» с различными реализациями в расположении волокон. Для оценки точности осуществляется сопоставление разброса полученных значений результатов расчета показаний датчика, обусловленного различными реализациями в расположении волокон в композитной пластине, с соответствующим результатом расчета показаний датчика с заменой композитной пластины областью с эффективными электроупругими свойствами. Для реальной композитной пластины проверка (оценка) инвариантности, как результата «фильтрации» показаний датчика от пульсаций, обусловленных гетерогенностью пластины вблизи ее границы контакта, может быть осуществлена посредством сопоставления и оценки различий показаний нескольких присоединенных к поверхности одной пластины датчиков при однородном простом и/или сложном (комбинированном) случае ее деформирования.

Датчик работает следующим образом. Деформирование ε^* нагруженной пластины приводит к деформированию закрепленного на ее поверхности датчика (см. рис. 1), в том числе к деформированию его чувствительных пьезоэлектрических, в частности, шести круговых цилиндрических секторных элементов 3 и возникновению в них различных пьезоэлектрических полей. Визуализация этих электрических полей в информативные световые сигналы происходит в результате возникновения на концентрических противолежащих границах круговых секторных электролюминесцентных элементов 2 информативных электрических напряжений с учетом их суммирования с контролируемой составляющей электрического напряжения на концентрических границах электролюминесцентных элементов 2 от действия управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}}$ на электродах 4, 5. Считаем, что интенсивности свечений I_j электролюминесцентных элементов однозначно связаны некоторой известной S-образной «функцией свечения» с действующими на них величинами электрических напряжений $U_{\text{люм}(j)}$ (1). Некомпланарные направления поляризации в пьезоэлектрических элементах 3 задаются из требования неравенства нулю определителя $|A| \neq 0$ квадратной матрицы $A_{jk} \equiv a_{\varepsilon(j,k)}$ (1) системы линейных алгебраических уравнений $\sum_{k=1}^n a_{\varepsilon(j,k)} \varepsilon_k^* = \Delta_j$, т.е. из условия однозначности разложений диагностируемых характеристик деформирования пластины

$$\varepsilon_k^* = \sum_{k=1}^n a_{\varepsilon(k,j)}^{-1} \Delta_j \quad (2)$$

по значениям компонент информативных составляющих

$$\Delta_j \equiv U_{\text{люм}(j)} - a_{U(j)} U_{\text{упр}} \quad (3)$$

электрических напряжений $U_{\text{люм}(j)}$ на концентрических границах электролюминесцентных элементов 2, где компоненты обратной матрицы $a_{\varepsilon(k,j)}^{-1}$. Значения информативных составляющих электрических напряжений Δ_j (2), (3) на электролюминесцентных элементах, как функций продольной координаты r_3 датчика, рассчитываются по разработанным алгоритмам обработки интенсивностей $I_{1,\dots,6}$ (см. рис. 1) интегральных полихромных световых сигналов на выходе из оптоволокна датчика [44–46], где даны примеры численного моделирования процессов диагностирования распределенных полей пьезоэлектролюминесцентными датчиками.

2. Численное моделирование

Рассмотрим математическую модель системы «фрагмент пластины – датчик» (см. рис. 1) с заменой композитной пластины областью с эффективными электроупругими свойствами. Считаем, что на показания датчика оказывают влияние лишь макроскопические составляющие быстроосциллирующих деформационных полей в объеме нагруженной композитной пластины, что обусловлено наличием буферного слоя, и, как следствие, показания датчика будут адекватными при замене (гомогенизации) реальной неоднородной области композитной пластины на однородную область с эффективными свойствами. При этом согласно «структурно-феноменологическому подходу» [49] решение задачи механики для композитной конструкции с эффективными свойствами представляет собой отдельную задачу (уже не связанную с размером неоднородностей композита) и может быть осуществлено традиционными численными методами механики, в частности методом конечных элементов. На характерный размер неоднородностей (статистически однородно распределенных в представительном объеме) композитной пластины в рассматриваемой модели в целом накладываются следующие условия: размер неоднородностей намного меньше толщины пластины, характерных размеров (толщины, ширины) буферного слоя и расстояния «значительного» изменения, в общем градиентных макроскопических деформационных полей. Для оценки и учета влияния (на неоднородное поле макродеформаций композитной пластины и, как следствие, на значения передаточных коэффициентов прикрепленного к ней датчика) градиентов поля макродеформаций в композитной пластине (особенно для случая значительных изменений макродеформаций на масштабе неоднородностей композита) могут быть применены известные методы [50, 51], в частности, асимптотические методы осреднения [50, 52] краевых задач теории упругости для периодических структур

с использованием «эффективных тензоров упругости различных уровней» дополнительно к традиционным тензорам эффективных упругих свойств композита. Отметим, что уточненные значения передаточных коэффициентов датчика с учетом градиентов макродеформаций композитной пластины могут быть найдены экспериментально с использованием реального фрагмента композитной пластины с закрепленным на ее поверхности датчиком.

Численное трехмерное моделирование взаимодействия и распределения неоднородных связанных электроупругих полей в элементах фрагмента системы «пластина – датчик» (см. рис. 1) реализовано для случая, когда датчик содержит шесть измерительных элементов и предназначен для диагностирования мембранных осевых, изгибных и крутильных обобщенных деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^* = \{\varepsilon_1^*, \varepsilon_3^*, \theta_1^*, \theta_3^*, \kappa_1^*, \kappa_3^*\}$ фрагмента пластины, где мембранные осевые деформации $\varepsilon_1^* \equiv \varepsilon_{11}^*$, $\varepsilon_3^* \equiv \varepsilon_{33}^*$, относительные углы поворотов поперечных сечений $\theta_{1,3}^*$ при закручивании фрагмента вокруг поперечной r_1 и продольной r_3 осей, кривизны $\kappa_{1,3}$ «изогнутых» осей $r_{1,3}$ нейтрального слоя фрагмента пластины при его изгибах в поперечной $r_1 r_2$ и продольной $r_2 r_3$ плоскостях, число измерительных элементов $n = 6$ (рис. 3). Численное моделирование проведено с использованием многопроцессорного вычислительного комплекса Центра высокопроизводительных вычислительных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Были использованы два вычислительных узла, оснащенных восьмиядерными процессорами Intel Xeon E5-2680 и 64 Гб оперативной памяти, в качестве коммуникативной среды – кластерная сеть InfiniBand стандарта 2.0.

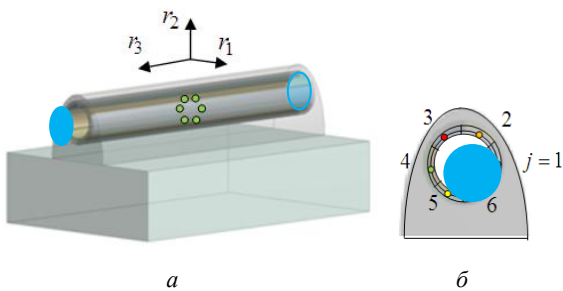


Рис. 3. Фрагмент композитной пластины с поверхностным датчиком (а), поперечное сечение датчика (б)

Fig. 3. The composite plate's fragment with the superficial sensor (a), the cross section of the sensor (b)

Были заданы следующие значения геометрических параметров численной модели для фрагмента композитной пластины с поверхностным датчиком (см. рис. 3). Фрагмент композитной пластины имеет форму параллелепипеда с численными значениями длин ребер:

12,5 мм, 4,5 мм, 20,2 мм, ориентированными вдоль соответствующих координатных осей $r_{1,2,3}$; фрагмент датчика длиной 20,2 мм расположен внутри полуэллиптического цилиндрического корпуса с буферным слоем вблизи границы контакта с пластиной, поперечное сечение корпуса – это половина эллипса с главными полуосями 2,25 мм, 4,3 мм вдоль $r_{1,2}$, радиусы концентрических круговых цилиндрических поверхностей: $r_{(1)} = 1$ мм, $r_{(2)} = 1,2$ мм, $r_{(3)} = 1,4$ мм; ось датчика направлена по оси r_3 и расположена на расстоянии 2,5 мм от основания датчика (поверхности пластины), при этом значения минимальных расстояний от цилиндрической поверхности электрода с радиусом $r_{(3)}$ до поверхности пластины 1,1 мм и до верхней полюсной точки корпуса 0,4 мм; фрагмент датчика с корпусом и буферным слоем прикреплен (с идеальным контактом) своим прямоугольным основанием посередине верхней грани параллелепипеда (пластины).

Электроупругие свойства фаз составного датчика: 1) изотропные упругие свойства оптоволокна были заданы численными значениями модуля Юнга $E_{(1)} = 50$ ГПа, коэффициента Пуассона $\nu_{(1)} = 0,25$, диэлектрической проницаемости $\lambda_{(1)} = 7 \lambda_0$; 2) изотропные свойства полимерного электролюминофора – $E_{(2)} = 0,8$ ГПа, $\nu_{(2)} = 0,43$, $\lambda_{(2)} = 2,3 \lambda_0$; 3) трансверсально-изотропные свойства пьезоэлектрика PVDF рассчитывались через главные значения [53] с учетом преобразований [46] для различных направлений поляризации секторов (см. рис. 2, б); 4) изотропные упругие свойства корпуса с буферной прослойкой из полиэтилена – $E_{(4)} = 0,73$ ГПа, $\nu_{(4)} = 0,46$, $\lambda_{(4)} = 0,5 \lambda_0$ [54]. Трансверсально-изотропные с осью симметрии r_3 свойства фрагмента пластины с эффективными свойствами однонаправленного волокнистого стеклопластика с объемной долей волокон 0,6 [48] задавались через его эффективные модули Юнга $E_1^* = 10,017$ ГПа, $E_3^* = 31,217$ ГПа, коэффициенты Пуассона $\nu_{12}^* = 0,521$, $\nu_{13}^* = 0,304$, модули сдвига $G_{12}^* = 3,294$ ГПа, $G_{13}^* = 3,581$ ГПа, относительные диэлектрические проницаемости $\lambda_{11}/\lambda_0 = 6,11$, $\lambda_{33}/\lambda_0 = 6,20$. Выполняются условия идеального контакта на всех концентрических цилиндрических и плоских межсекторных межфазных поверхностях с учетом, что на цилиндрических границах с радиусами $r_{(1)}$, $r_{(3)}$ заданы значения управляющих электрических потенциалов, на внутреннем электроде принимали равенство $\phi_{|r=r_{(1)}} = 0$; на гранях параллелепипеда электрический потенциал приравнен нулю. На рис. 3 символами (●) показаны места расположений и нумерация контрольных точек

для снятия численных значений электрических потенциалов $\varphi_{1,\dots,6}$ на границе электролюминофор – пьезоэлектрик в срединном поперечном сечении фрагмента датчика при численном моделировании функционирования датчика.

Расчетная область (см. рис. 3, а) была дискретизирована на $26 \cdot 10^6$ конечных элементов, из которых $17,5 \cdot 10^6$ – для составной области «датчик в корпусе», состоящей из самого датчика и полуэллиптического корпуса с буферным слоем; максимальный размер элемента – 0,2 мм, а минимальный – 0,02 мм. Такая степень дискретизации и призматическая гексагональная форма ячеек были выбраны в результате проведенной оценки сходимости численного решения для каждого расчетного случая (рис. 4–9) и минимизации погрешностей получаемых численных решений. При задании материальных констант определяющих соотношений электроупругости для конечных элементов численной модели в глобальной системе координат $r_{1,2,3}$ учитывались ориентации осей симметрии трансверсально-изотропных электроупругих свойств: вдоль оси r_3 – для пластины и вдоль заданных [46, 47] шести различных направлений поляризации $\mathbf{d}_{1,\dots,6}$ секторов пьезоэлектрического слоя датчика с учетом различных направлений поляризации секторов (см. рис. 2, б), при этом были использованы формулы преобразования компонент тензоров электроупругих свойств пьезоэлектрических секторов при переходе от их локальных (или главных) осей координат к глобальным осям координат $r_{1,2,3}$ [46]. Для решения систем линейных 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.

Для расчета информативных обобщенных деформационных передаточных коэффициентов $\mathbf{a}_{\varepsilon(j)}$ разложения (1) для фрагмента пластины с датчиком (см. рис. 3) последовательно рассматривались (при заданных нулевых значениях управляющих потенциалов на электродах датчика) простые ε^* обобщенные деформации фрагмента: мембранные деформации $\varepsilon_{1,3}^* = 10^{-5}$ (см. рис. 4, 5), радиусы кривизн изогнутых осей нейтрального слоя фрагмента пластины $\rho_{1,3} \equiv 1/\kappa_{1,3} = 1\text{м}$ при изгибах фрагмента в поперечной r_1r_2 и продольной r_2r_3 плоскостях (см. рис. 6, 7), относительные углы поворотов поперечных сечений $\theta_{1,3}^* = 1$ рад/м при закручиваниях фрагмента вокруг поперечной r_1 и продольной r_3 осей (см. рис. 8, 9). Для расчета управляющих передаточных коэффициентов $a_{U(j)}$ разложения (1)

рассматривался случай действия на управляющих электродах датчика единичного электрического напряжения $U_{\text{упр}}$, заданного через электрические потенциалы на «внутреннем» электроде 0 и на «внешнем» электроде 1 В, для случая отсутствия обобщенных деформаций $\varepsilon^* = 0$ (рис. 10), т.е. в отсутствие перемещений точек внешних поперечных сечений фрагмента пластины с датчиком (см. рис. 3, а). Мембранные осевые деформации $\varepsilon_{1,3}^*$ задавались через перемещения вдоль осей $r_{1,3}$ соответствующих боковых сечений фрагмента пластины с закрепленным на ней датчиком (см. рис. 3, а), а изгибы и закручивания – через закрепление одного и приложение изгибающего или крутящего момента (которые обозначены красным цветом на рис. 4–9) к противоположному ему боковому сечению фрагмента пластины с закрепленным на ней датчиком.

На рис. 4–9 представлены результаты численного моделирования: значения электрических потенциалов $\varphi_{1,\dots,6}$ в контрольных точках (●) на границе электролюминофор – пьезоэлектрик в срединном (см. рис. 3, а) кольцевом поперечном сечении электролюминесцентного слоя фрагмента датчика (см. рис. 4, а – рис. 9, а), изолинии полей напряжений в характерных сечениях пластины (см. рис. 4, б – рис. 9, б), по внешней цилиндрической поверхности и сечениям датчика (см. рис. 4, в – рис. 9, в) для простых случаев нагружений фрагмента пластины с закрепленным на нем датчиком при «нулевом» значении управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}} = 0$.

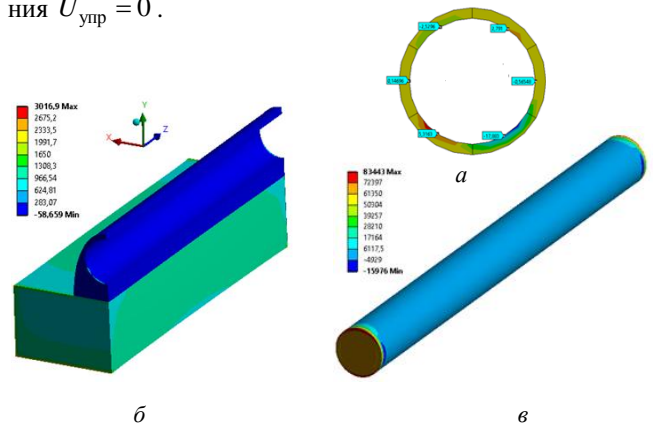


Рис. 4. Потенциалы $\varphi_{1,\dots,6}$ (а) и поле напряжений σ_{zz} (б), (в) при растяжении по оси z

Fig. 4. Potentials $\varphi_{1,\dots,6}$ (a) and stress field σ_{zz} (b), (c) under tension along axis z

Отсутствие симметрии в значениях электрических потенциалов в контрольных точках и в изолиниях на рис. 4–9 обуславливается отсутствием симметрии для поля электроупругих свойств пьезоэлектрического секторного слоя датчика, в частности, отсутствием плоскостей симметрии, имеющихся для геометрии расчетной области, в результате различных пространственных

ориентаций главных осей анизотропии (направлений поляризаций) для шести различных круговых секторов пьезоэлектролюминесцентного слоя датчика.

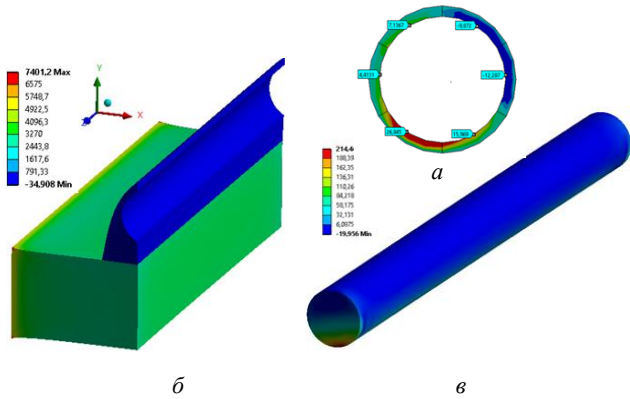


Рис. 5. Потенциалы $\varphi_{1,...,6}$ (a) и поле напряжений σ_{xx} (б), (в) при растяжении по оси x

Fig. 5. Potentials $\varphi_{1,...,6}$ (a) and stress field σ_{xx} (b), (c) under tension along axis x

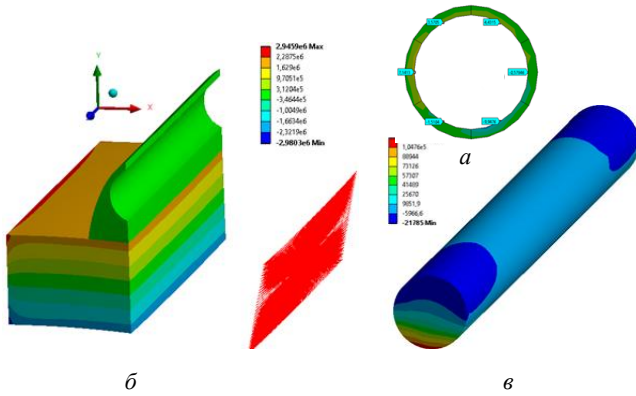


Рис. 6. Потенциалы $\varphi_{1,...,6}$ (a) и поле напряжений σ_{xx} (б), (в) при изгибе вокруг оси z

Fig. 6. Potentials $\varphi_{1,...,6}$ (a) and stress field σ_{xx} (b), (c) under bending around axis z

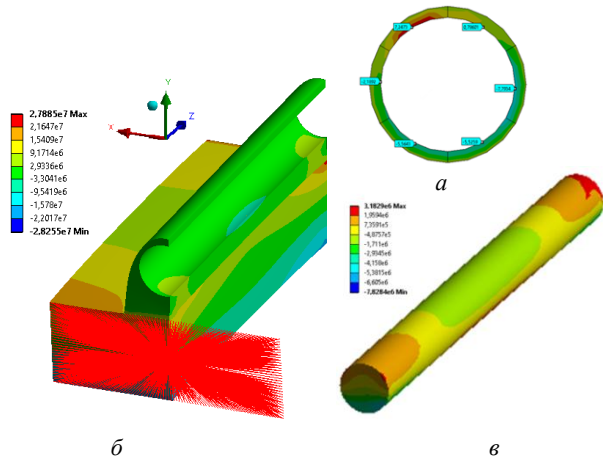


Рис. 7. Потенциалы $\varphi_{1,...,6}$ (a) и поле напряжений σ_{zz} (б), (в) при изгибе вокруг оси x

Fig. 7. Potentials $\varphi_{1,...,6}$ (a) and stress field σ_{zz} (b), (c) under bending around axis x

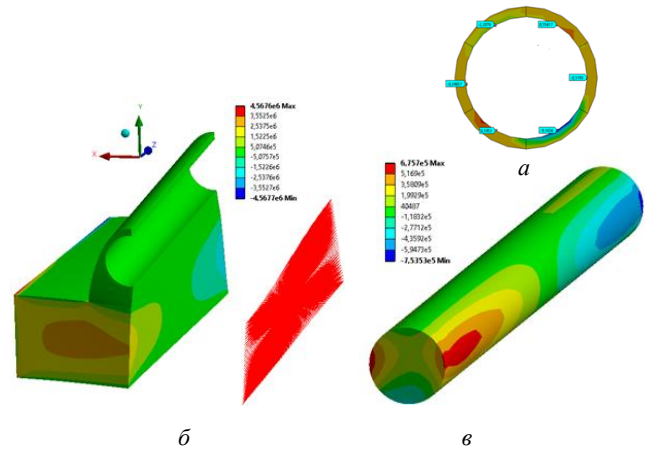


Рис. 8. Потенциалы $\varphi_{1,...,6}$ (a) и поле напряжений σ_{yz} (б), (в) при кручении вокруг оси x

Fig. 8. Potentials $\varphi_{1,...,6}$ (a) and stress field σ_{yz} (b), (c) under twisting around axis x

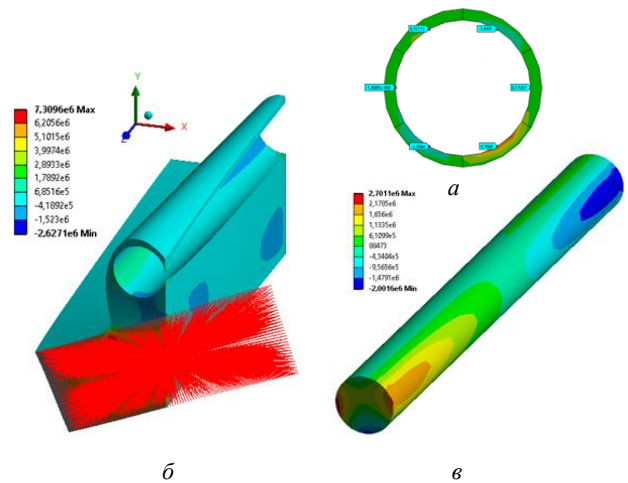


Рис. 9. Потенциалы $\varphi_{1,...,6}$ (a) и поле напряжений σ_{xy} (б), (в) при кручении вокруг оси z

Fig. 9. Potentials $\varphi_{1,...,6}$ (a) and stress field σ_{xy} (b), (c) under twisting around axis z

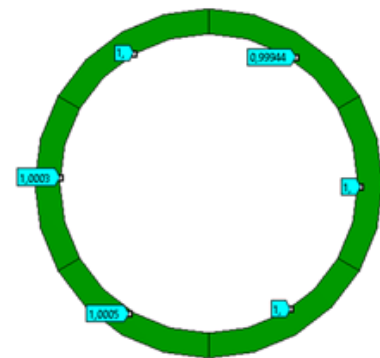


Рис. 10. Потенциалы $\varphi_{1,...,6}$ при применении управляющего электрического напряжения $U_{упр} = 1\text{В}$

Fig. 10. Potentials $\varphi_{1,...,6}$ under control electric voltage $U_{con} = 1\text{V}$

На рис. 4–9 координатные оси x, y, z соответствуют ранее принятым обозначениям $r_{1,2,3}$. На рис. 10 представлены результаты расчета значений электрических потенциалов $\phi_{1,\dots,6}$ в контрольных точках при приложении управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}} = 1\text{В}$ при отсутствии макродеформаций $\epsilon^* = 0$.

Таким образом, на практике искомые значения диагностируемых обобщенных мембранных и моментных деформаций ϵ^* композитных пластин становится возможным найти (2) из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$[A] \begin{Bmatrix} \epsilon_1^* 10^5 \\ \epsilon_3^* 10^5 \\ \theta_1^* \\ \theta_3^* \\ \kappa_1^* \\ \kappa_3^* \end{Bmatrix} = \{\Delta\} \quad (4)$$

по найденным компонентам $\Delta_{(j)}$ (3) с учетом управляющих коэффициентов датчика $a_{U(j)}$ (1), (3) с численными значениями: 1,0000; 0,99944; 1,0000; 1,0003; 1,0005; 1,0000 для $j = \overline{1,6}$ соответственно, где

$$\{\Delta\} = \begin{Bmatrix} \Delta_{(1)} \\ \dots \\ \Delta_{(6)} \end{Bmatrix},$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -12,287 & -0,565 & -0,379 & 0,173 & -0,578 & -7,793 \\ -9,872 & 2,791 & 0,356 & -1,049 & 4,432 & 0,786 \\ 7,137 & -2,530 & -2,208 & 0,721 & 3,571 & 7,247 \\ 4,413 & 0,147 & -0,297 & -0,014 & 7,141 & -2,189 \\ 26,845 & 5,316 & 0,595 & -2,089 & -1,510 & -5,564 \\ 15,969 & -17,883 & -9,144 & 4,166 & -9,948 & -5,526 \end{bmatrix} \quad (5)$$

с определителем $|A| \neq 0$, размерности численных значений элементов матрицы $[A]$ (5) в первом и втором столбцах – [В], а в остальных четырех столбцах – [Вм/рад].

При реальном комбинированном нагружении ϵ^* фрагмента пластины с датчиком (см. рис. 3, а) значения электрических напряжений $\Delta_{(j)}$ (4), (5) на каждом j -м электролюминесцентном элементе датчика вычисляются по алгоритмам сканирования [43, 44] через обработку интенсивностей $I_{1,\dots,6}$ шести различных (по цветности) световых сигналов на выходе из оптоволоконного датчика. Уточнение численных значений передаточных коэффициентов (5) может быть осуществлено в результате дополнительного учета в математической модели системы

«пластина – датчик» электропроводности фаз, релаксации электрических зарядов и частотных зависимостей характеристик датчика.

Заключение

В пакете прикладных программ ANSYS разработана трехмерная численная модель функционирования пьезоэлектр люминесцентного оптоволоконного датчика, закрепленного на поверхности фрагмента композитной пластины (см. рис. 1) [43]. Датчик состоит из центрального оптоволоконного с оболочкой из коаксиальных секторно-составных электролюминесцентного и пьезоэлектрического слоев и размещен внутри внешней защитной оболочки в виде однородного полуэллиптического цилиндрического корпуса с буферным слоем, контактирующим с поверхностью композитной пластины. В датчике между оптоволоконным и электролюминесцентным слоем расположен тонкий светопрозрачный «внутренний», а пьезоэлектрический слой покрыт снаружи тонким «внешним» управляющими электродами. Совместное деформирование композитной пластины и закрепленного на ней датчика обуславливает появление в чувствительных пьезоэлектрических элементах датчика информативных пьезоэлектрических полей, которые суммируются с электрическим полем управляющего электрического напряжения на электродах и вызывают различные монохромные свечения электролюминесцентных элементов датчика. Световые потоки проникают через фотопрозрачный внутренний электрод внутрь оптоволоконного и далее передаются к приемнику-анализатору на выходе из оптоволоконного.

В результате численного моделирования найдены распределения существенно неоднородных электроупругих полей в расчетной области системы «пластина – датчик в корпусе» и найдены численные значения электрических потенциалов $\phi_{1,\dots,6}$ в контрольных точках на границе электролюминофор/пьезоэлектрик в среднем кольцевом поперечном сечении электролюминесцентного слоя фрагмента датчика (см. рис. 4–10) при простых случаях нагружений ϵ^* фрагмента пластины, в частности: растяжениях вдоль поперечной и продольной осей, закручиваниях вокруг этих осей и изгибах в поперечной и продольной плоскостях и, дополнительно, при действии единичного электрического напряжения $U_{\text{упр}}$ на электродах датчика. Определены численные значения управляющих $a_{U(j)}$ и информативных $a_{\epsilon(j)}$ передаточных коэффициентов (1) поверхностного датчика. Диагностирование деформирования ϵ^* композитных пластин осуществляется с использованием найденных значений управляющих $a_{U(j)}$ и информативных $a_{\epsilon(j)}$ передаточных коэффициентов по алгоритмам

[44–46] обработки интегральных интенсивностей $I_{1,\dots,6}$ полихромных световых сигналов на выходе из оптического датчика. Далее по найденным значениям макродеформаций ϵ^* и характеристикам взаимного расположения неоднородностей в композитной пластине, в частности, с использованием периодической, квазипериодической или стохастической моделей рассчитываем по известным формулам [48–50] деформационные поля в элементах структуры пластины, в том числе с учетом градиентов полей макродеформаций на масштабе элементарных стохастических или периодических ячеек структуры [50], что в результате даст возможность осуществить оценку прочности композитной пластины как на ее структурном, так и, в целом, на ее макроуровне.

Библиографический список

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с.
3. Неразрушающий контроль изделий из полимерных композиционных материалов / А.Н. Аношкин, А.Ф. Сальников, В.М. Осокин, А.А. Третьяков, Г.С. Лузин, Н.Н. Потрахов, В.Б. Бессонов // IV Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 96 с. – С. 85–90.
4. Application of operational radiographic inspection method for flaw detection of blade straightener from polymeric composite materials / A.N. Anoshkin, V.M. Osokin, A.A. Tret'yakov, N.N. Potrakhov, V.B. Bessonov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 808, no. 1. – P. 012003.
5. Технология оперативного рентгеновского контроля изделий из полимерных композиционных материалов / Н.Н. Потрахов, К.К. Жамова, В.Б. Бессонов, А.Ю. Грязнов, А.В. Ободовский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 43. – С. 97–115.
6. Карташова Е.Д., Муйземек А.Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 79–89.
7. Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления и методы неразрушающего контроля деталей, полученных по аддитивным технологиям / В.В. Мурашов, М.В. Григорьев, А.С. Лаптев, И.С. Краснов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. докл. II Междунар. конф. – 2016. – С. 37.
8. Мурашов В.В. Контроль качества изделий из полимерных композиционных материалов акустическими методами // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 16–29.
9. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 4. – С. 23–32.

Благодарности

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

Acknowledgments

The results were obtained during the fulfillment of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of fundamental scientific research (project No. FSNM-2020-0026).

10. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 5. – С. 31–42.
11. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 29–33.
12. Никитина Н.Е., Казачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С. 18–28.
13. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами [Электронный ресурс]. – М.: Спектр, 2016. – 344 с. – URL: <http://www.idspekt.ru/index.php/home/522-138>
14. Неразрушающий контроль ПКМ с использованием фазированных решеток / А.С. Бойчук, А.С. Генералов, А.В. Степанов, О.В. Юхацкова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – № 2. – С. 54–58.
15. Мурашов В.В. Применение ультразвукового резонансного метода для выявления дефектов клееных конструкций. – Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 1(50). – С. 88–94.
16. Григорьев М.В., Прилуцкий М.А., Щипаков Н.А. Обоснование выбора параметров ультразвукового контроля углепластиков для обнаружения расслоений и ударных повреждений // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 5. – С. 58–65.
17. Гайдачук В.Е., Коваленко В.А. Уровни дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства // Технология производства летательных аппаратов. Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 6(93). – С. 5–12.
18. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
19. Патент RU № 2537105. Способ измерения деформаций / Томилов М.Ф., Томилов Ф.Х., опубл.: 27.12.2014. Бюл. № 36; заявка № 2013102795 от 22.01.2013 г.

20. Патент RU № 2539106. Способ диагностирования состояния конструкции / Баурова Н.И., Зорин В.А., опублик.: 10.01.2015. Бюл. № 1; заявка № 2013126704 от 11.06.2013 г.
21. Патент RU № 2395786. Способ диагностирования состояния конструкции / Баурова Н.И., Зорин В.А., опублик.: 27.07.2010. Бюл. № 21; заявка № 2009120944 от 03.06.2009 г.
22. Патент RU № 2439518. Способ диагностирования состояния конструкции / Баурова Н.И., Зорин В.А., опублик.: 10.01.2012. Бюл. № 1; заявка № 2010146153 от 13.11.2010 г.
23. Патент RU № 2335511. Материал, чувствительный к давлению / Хамнер М.П., Маллигэн Р.Ф., опублик.: 10.10.2008. Бюл. № 28, заявка № 2005117636 от 07.11.2003 г.
24. Цифровая голографическая интерферометрия микродеформаций рассеивающих объектов / О.В. Диков, С.А. Савонин, В.И. Качула, О.А. Перепелицына, В.П. Рябухо // Известия Саратовского университета. Серия: Физика. – 2012. – Т. 12, № 1. – С. 12–17.
25. Кузнецов Р.А. Разработка системы неразрушающего контроля на основе методов цифровой голографической интерферометрии: дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2013. – 117 с.
26. Патент RU № 2263885. Оптический тактильный датчик / Тати С., Кадзимото Х., опублик.: 10.11.2005. Бюл. № 31; заявка № 2003108731 от 30.08.2001 г.
27. Патент RU № 2518616. Способ измерения деформаций объектов из немагнитных материалов и установка для его осуществления / Архангельский П.В., Марценюк М.А., Машкин С.В., опублик.: 10.06.2014. Бюл. № 16; заявка № 2011143080 от 26.10.2011 г.
28. Никитина Н.Е., Казачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С. 18–28.
29. Патент RU № 2530467. Тензометрический датчик / Поярков А.В., Федоринин В.Н., Паулиш А.Г., Сущих А.А., Шапор П.И., опублик.: 10.10.2014. Бюл. № 28, заявка № 2013131875 от 09.07.2013 г.
30. 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.
31. Шардаков И.Н., Созонов Н.С., Цветков Р.В. Экспериментально-теоретические основы автоматизированных систем деформационного мониторинга с использованием волоконно-оптических элементов // Вестник Пермского научного центра. – 2016. – Октябрь–декабрь. – С. 91–95.
32. Наймушин И.Г., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Численный анализ деформационных процессов в оптоволоконном датчике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 1. – С. 104–116.
33. Матвеев В.П., Федорова В.А., Шардаков И.Н. Теоретическое обоснование возможности построения волоконно-оптической системы мониторинга деформаций земной поверхности // Изв. РАН. МГТ. – 2013. – № 5. – С. 46–52.
34. 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.
35. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. – М.: Техносфера, 2006. – 223 с.
36. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 628 с.
37. Сорокин К.В., Мурашов В.В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (Обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 3 (36). – С. 90–94.
38. Макарова Н.Ю. Тактильные сенсоры роботов на основе механолюминесцентных датчиков. – Изд-во LAP LambertAcademicPublishing, 2011. – 200 с.
39. Крауя У.Э., Янсонс Я.Л. Механолюминесценция композитных материалов: Методы, аппаратура и результаты исследований / Латв. АН, Ин-т механики полимеров, НИИ физики твердого тела Латв. ун-та. – Рига: Зинатне, 1990. – 152 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001566602>
40. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites / Y. Jia, X. Tian, Z. Wu, X. Tian, J. Zhou, Y. Fang, C. Zhu // Sensors. – 2011. – No. 4. – P. 3962–3969.
41. Патент RU 2630537. Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А., опублик.: 11.09.2017. Бюл. № 26; заявка № 2016136058 от 06.09.2016 г.
42. Патент RU № 2643692. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А., опублик.: 05.02.2018. Бюл. № 4; заявка № 2017111405 от 04.04.2017 г.
43. Патент RU № 2684001. Датчик вибраций / Паньков А.А., опублик.: 03.04.2019. Бюл. № 10; заявка № 2017137934 от 30.10.2017 г.
44. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – Vol. 288. – P. 171–176.
45. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent optical fiber sensor for diagnostics of the stress state and defectoscopy of composites // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53, no. 2. – P. 229–242.
46. Pan'kov A.A. A piezoelectroluminescent fiber-optical sensor for diagnostics of the 3D stress state in composite structures // Mechanics of Composite Materials. – 2018. – Vol. 54, no. 2. – P. 155–164.
47. Паньков А.А., Писарев П.В. Численное моделирование в ANSYS электроупругих полей в пьезоэлектролюминесцентном оптоволоконном датчике диагностирования объемного деформированного состояния композита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 3. – С. 153–166.
48. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. – Мн.: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1978. – 208 с.
49. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.
50. Победра Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
51. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
52. Горбачев В.И. Инженерная теория деформирования неоднородных пластин из композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 585–601.
53. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride // J. Acoust. Soc. Amer. – 1981. – Vol. 70, no. 6. – P. 1596–1608.
54. Турик А.В., Радченко Г.С. Гигантский пьезоэлектрический эффект в слоистых композитах сегнетоэлектрик–

References

1. Frajden Dzh., Sovremennye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Reference book]. Moscow, Tekhnosfera, 2005, 592 p.
2. Etkin L.G. Vibrochastotnye datchiki. Teoriya i praktika [Vibrofrequency sensors. Theory and practice]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2004, 408 p.
3. Anoshkin A.N., Sal'nikov A.F., Osokin V.M., Tretyakov A.A., Luzin G.S., Potrahov N.N., Bessonov V.B. Nerazrushayushchij kontrol' izdelij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Nondestructive monitoring of designs from polymeric composites]. IV Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya proizvozditelej rentgenovskoj tekhniki. Programma i materialy konferencii, Saint-Petersburg.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2017, 96 p., pp. 85-90.
4. Anoshkin A.N., Osokin V.M., Tretyakov A.A., Potrahov N.N., Bessonov V.B. Application of operational radiographic inspection method for flaw detection of blade straightener from polymeric composite materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 808, no.1, p. 012003.
5. Potrahov N.N., ZHamova K.K., Bessonov V.B., Gryaznov A.YU., Obodovskij A.V. Tekhnologiya operativnogo rentgenovskogo kontrolya izdelij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Technology of operating X-ray inspection of designs from polymeric composites]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2015, no. 43, pp. 97-115.
6. Kartashova E.D., Mujzemnek A.YU. Tekhnologicheskie defekty polimernyh sloistyh kompozicionnyh materialov [Technological defects of polymeric layered composites]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2 (42), pp.79-89.
7. Murashov V.V., Grigor'ev M.V., Laptev A.S., Krasnov I.S. Klassifikaciya defektov metallicheskih materialov, sintezirovannyh metodom selektivnogo lazernogo splavleniya i metody nerazrushayushchego kontrolya detalej, poluchennyh po additivnym tekhnologiyam [Classification of defects of the metal materials synthesized by method of the selection laser alloyage and methods of nondestructive monitoring of the details received on the additive technologies]. V sb.: «Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee» sbornik dokladov II Mezhdunarodnoj konferencii, 2016, p. 37.
8. Murashov V.V. Kontrol' kachestva izdelij iz polimernyh kompozicionnyh materialov akusticheskimi metodami [Quality control of designs from polymeric composites by acoustic methods]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 16-29.
9. Murashov V.V., Rumyanec A.F. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslujnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov i metody ih vyyavleniya [Defects of monolithic details and sandwiches from polymeric composites and methods of their identification]. CHast' 1. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslujnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Defects of monolithic details and sandwiches from polymeric composites]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 4, pp. 23-32.
10. Murashov V.V., Rumyanec A.F. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslujnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov i metody ih vyyavleniya [Defects of monolithic details and sandwiches from polymeric composites and methods of their identification]. CHast' 2. Metody vyyavleniya defektov monolitnyh detalej i mnogoslujnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Methods of identification of defects of monolithic details and sandwiches from polymeric composites]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no.5, pp. 31-42.
11. 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.
12. Nikitina N.E., Kazachek S.V. Preimushchestva metoda akoustouprugosti dlya nerazrushayushchego kontrolya mekhanicheskikh napryazhenij v detalyah mashin [Advantages of method of acoustoelasticity to nondestructive control of mechanical tension in details of designs]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 4 (32), pp.18-28.
13. Murashov V.V. Kontrol' i diagnostika mnogoslujnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov akusticheskimi metodami [Monitoring and diagnostics of sandwiches from polymeric composites by acoustic methods]. Moscow, Izd-vo: Izdatel'skij dom "Spektr", 2016, 344 p., <http://www.idspektr.ru/index.php/home/522-138>.
14. Bojchuk A.S., Generalov A.S., Stepanov A.V., Yuhackova O.V. Nerazrushayushchij kontrol' PKM s ispol'zovaniem fazirovannyh reshetok [Nondestructive monitoring of PCM with use of the phased lattices]. *Promyshlennye ASU i kontrolyer*, 2013. no. 2, pp. 54-58.
15. Murashov V.V. Primenenie ul'trazvukovogo rezonansnogo metoda dlya vyyavleniya defektov kleenyh konstrukcij [Application of an ultrasonic resonant method for identification of defects of glued designs]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 1(50), pp. 88-94.
16. Grigor'ev M.V., Priluckij M.A., SHCHipakov N.A. Obosnovanie vybora parametrov ul'trazvukovogo kontrolya ugleplastikov dlya obnaruzheniya rassloenij i udarnyh povrezhdenij [Proof of the choice of parameters of ultrasonic examination of coal plastics for detection of stratifications and shock damages]. *Mashiny i Ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn.*, 2015, no. 5, pp. 58-65.
17. Gajdachuk V.E., Kovalenko V.A. Urovni defektov struktury v izdeliyah iz polimernyh kompozicionnyh materialov, vznikayushchih v processe ih proizvodstva [Levels of defects of structure in designs from the polymeric composites arising in the course of their production]. *Tekhnologiya proizvodstva letatel'nyh apparatov. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 6(93), pp. 5-12.
18. Mekheda V.A. Tenzometricheskij metod izmereniya deformacij [Strain-measuring method of measurement of deformations]. *Samara, Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta*, 2011, 56 p.
19. Patent RU № 2537105. Sposob izmereniya deformacij [Method of strain measurement] / Tomilov M.F., Tomilov F.H., opubl.: 27.12.2014 Byul. № 36; zayavka № 2013102795 ot 22.01.2013 g.
20. Patent RU № 2539106. Sposob diagnostirovaniya sostoyaniya konstrukcii [Method of diagnosing the state of the structure] / Baurova N.I., Zorin V.A., opubl.: 10.01.2015 Byul. № 1; zayavka № 2013126704 ot 11.06.2013 g.
21. Patent RU № 2395786. Sposob diagnostirovaniya sostoyaniya konstrukcii [Method of diagnosing the state of the structure] / Baurova N.I., Zorin V.A., opubl.: 27.07.2010 Byul. № 21; zayavka № 2009120944 ot 03.06.2009 g.
22. Patent RU № 2439518. Sposob diagnostirovaniya sostoyaniya konstrukcii [Method of diagnosing the state of the

structure] / Baurova N.I., Zorin V.A., opubl.: 10.01.2012 Byul. № 1; zayavka № 2010146153 ot 13.11.2010 g.

23. Patent RU № 2335511. Material, chuvstvitel'nyj k davleniyu [Material sensitive to Pressure] / Hamner M.P., Malligen R.F., opubl.: 10.10.2008 Byul. № 28, zayavka № 2005117636 ot 07.11.2003 g.

24. Dikov O.V., Savonin S.A., Kachula V.I., Perepelicyna O.A., Ryabuh V.P. Cifrovaya golograficheskaya interferometriya mikrodeformacij rasseivayushchih ob'ektov [Digital holographic interferometry of microdeformations of the dissipating objects]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta*, 2012, vol. 12, Ser. Fizika, no. 1, pp. 12-17.

25. Kuznetsov R.A. Razrabotka sistemy nerazrushayushchego kontrolya na osnove metodov cifrovoj golograficheskoy interferometrii [Development of the system of nondestructive control on the basis of methods of digital holographic interferometry]. Dissert. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk, g. Novosibirsk, 2013, 117 p.

26. Patent RU № 2263885. Opticheskij taktil'nyj datchik [Optical tactile sensor] / Tati S., Kadzimoto H., opubl.: 10.11.2005 Byul. № 31; zayavka № 2003108731 ot 30.08.2001 g.

27. Patent RU № 2518616. Sposob izmereniya deformacij ob'ektov iz nemagnitnykh materialov i ustanovka dlya ego osushchestvleniya [Method of measuring deformations of objects from non-magnetic materials and installation for its implementation] / Arhangel'skij P.V., Marcenyuk M.A., Mashkin S.V., opubl.: 10.06.2014 Byul. № 16; zayavka № 2011143080 ot 26.10.2011 g.

28. Nikitina N.E., Kazachek S.V. Preimushchestva metoda akoustouprugosti dlya nerazrushayushchego kontrolya mekhanicheskikh napryazhenij v detalyah mashin [Advantages of method of acoustoelasticity to nondestructive control of mechanical tension in details of designs]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 4 (32), pp.18-28.

29. Patent RU № 2530467. Tenzometricheskij datchik [Tensometric sensor] / Poyarkov A.V., Fedorinin V.N., Paulish A.G., Sushchih A.A., Shapor P.I., opubl.: 10.10.2014 Byul. № 28, zayavka № 2013131875 ot 09.07.2013 g.

30. 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 polimernykh kompozicionnykh materialah [Use of optical fiber as deformation sensors in polymeric composite materials]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*, 2010, no. 3, pp. 10-15.

31. Shardakov I.N., Sozonov N.S., Cvetkov R.V. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy avtomatizirovannykh sistem deformacionnogo monitoringa s ispol'zovaniem volokonno-opticheskikh elementov [Experimental and theoretical bases of the automated systems of deformation monitoring with use of fiber-optical elements]. *Vestnik Permskogo nauchnogo centra*, 2016, Okt'yabr'-dekabr', pp. 91-95.

32. Najmushin I.G., Trufanov N.A., Shardakov I.N. The numerical analysis of deformation processes in the fiber-optic sensor. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 1, pp. 104-116.

33. Matveenkov V.P., Fedorova V.A., Shardakov I.N. Teoreticheskoe obosnovanie vozmozhnosti postroeniya volokonno opticheskoi sistemi monitoringa deformacii zemnoi poverhnosti [Theoretical proving of possibility of creation of fiber-optical system of monitoring of deformations of the land surface]. *Izv. RAN. MTT*, 2013, no. 5, pp. 46-52.

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

35. Uorden K. Novye intellektual'nye materialy i konstrukcii [New intellectual materials and designs]. *Moscow, Tekhnosfera*, 2006, 223 p.

36. Sharapov V.M., Musienko M.P., SHarapova E.V. P'ezo-elektricheskie datchiki [Piezoelectric sensors]. M.: Tekhnosfera, 2006, 628 p.

37. Sorokin K.V., Murashov V.V. Mirovye tendencii razvitiya raspredelennykh volokonno-opticheskikh sensorykh 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.

38. Makarova N.YU. Taktil'nye sensory robotov na osnove mekhanolyuminescentnykh datchikov [Tactile sensors of robots on the basis of mechanoluminescent sensors]. *Izd-vo LAP Lambert Academic Publishing*, 2011, 200 p.

39. Krauya U.E. Mekhanolyuminescenciya kompozitnykh materialov: Metody, apparatura i rezul'taty issledovaniy [Mechanoluminescence of composite materials: Methods, equipment and results of researches]. *U. E. Krauya, YA. L. YAnsons; Latv. AN, In-t mekhaniki polimerov, NII fiziki tverdogo tela Latv. un-ta, Riga: Zinatne*, 1990, 152 p., <https://search.rsl.ru/ru/record/01001566602>

40. Jia Y., Tian X., Wu Z., Tian X., Zhou J., Fang Y., Zhu C. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric electroluminescent composites. *Sensors*, 2011, no. 4, pp. 3962-3969.

41. Patent RU 2630537. Volokonno-opticheskij datchik davleniya [Pressure fiber optic sensor]. Pan'kov A.A., opubl. 11.09.2017 Byul. № 26; zayavka no. 2016136058 ot 06.09.2016 g.

42. 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.

43. Patent RU 2684001. Datchik vibracij [Sensor of vibrations]. Pan'kov A.A., opubl.: 03.04.2019 Byul. no. 10; zayavka no. 2017137934 ot 30.10.2017 g.

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

45. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent optical fiber sensor for diagnostics of the stress state and defectoscopy of composites. *Mechanics of Composite Materials*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 229-242.

46. Pan'kov A.A. A piezoelectroluminescent fiber-optical sensor for diagnostics of the 3D stress state in composite structures. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 155-164.

47. Pan'kov A.A., Pisarev P.V. Numerical modeling in ANSYS of electroelastic fields in the piezo electro luminescent fiber-optical sensor of the diagnosing of volume deformed state of composite. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 3, pp. 153-166.

48. Volkov S.D., Stavrov V.P. Statisticheskaya mekhanika kompozitnykh materialov [Statistical mechanics of composite materials]. *Minsk.: Izd-vo Belarus. gos. un-ta*, 1978, 208 p.

49. Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya strukturno neodnorodnykh tel [Mechanics of deformation and destruction of structurally heterogeneous bodies]. *Moscow, Nauka*, 1984, 115 p.

50. Pobedrya B.E. Mekhanika kompozicionnykh materialov [Mechanics of composite materials]. *Moscow, Izd-vo Mosk. Universiteta*, 1984, 336 p.

51. Vasilev V.V. Mekhanika konstrukcii iz kompozicionnykh materialov [Mechanics of structures made of composite materials]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1988, 264 p.

52. Gorbachev V.I. Injenernaya teoriya deformirovaniya neodnorodnykh plastin iz kompozicionnykh materialov [Engineering theory of deformation of non-uniform plates from composite materials]. *Mekhanika kompozicionnykh materialov i konstrukcii*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 585-601.

53. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981, vol. 70, no. 6, pp. 1596-1608.

54. Turik A.V., Radchenko G.S. Gigantskij p'ezoelektricheskij effekt v sloistykh kompozitah segnetoelektrik-polimer [Huge piezoelectric effect in layered composites a ferroelectric material polymer]. *Fizika tverdogo tela*, 2003, vol. 45, no. 9, pp. 1676-1679.