

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лесникова Ю.И. Анализ влияния двухслойного защитно-упрочняющего покрытия на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 49–61. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.07

Please cite this article in English as:

Lesnikova Yu.I. Analysis of the influence of a multi-layer protective coating on the deformation and optical characteristics of a Panda type fiber. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 49-61. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 1, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.07

УДК 539.3

Ю.И. Лесникова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ЗАЩИТНО-УПРочНЯЮЩЕГО
ПОКРЫТИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКНА ТИПА PANDA**

Исследуется анизотропное одномодовое оптическое волокно типа Panda с диаметром по кварцу 80 мкм, покрытое двухслойным полимерным защитно-упрочняющим покрытием (ЗУП) диаметром 167 мкм, которое используется для изготовления чувствительного контура оптоволоконного гироскопа. Моделируется промежуточное испытание волновода после изготовления: волокно с силой натяжения 0,2 Н наматывается в один ряд на алюминиевую катушку и подвергается термоциклированию по заданному закону в диапазоне эксплуатационных температур $-60 \div 60$ °С. В рамках работы рассмотрено 7 вариантов соотношений внутреннего и внешнего ЗУП при сохранении общего диаметра волокна с учетом гетерогенных свойств конструктивных элементов, вязкоупругих свойств материалов ЗУП и контактного взаимодействия волокна с катушкой без учета трения по сопрягаемым поверхностям. В рассматриваемый диапазон температур частично попадают релаксационные переходы в обоих слоях ЗУП, что приводит к появлению деформации ползучести и изменению многих физико-механических характеристик материала. Поведение материалов ЗУП описывается теорией линейной вязкоупругости средствами модели Ргопу, для учета влияния температуры на свойства материалов ЗУП используется температурно-временная аналогия, описываемая уравнением Вильямса – Ланделла – Ферри. В результате численных экспериментов получены зависимости, описывающие эволюции напряженно-деформированного состояния в волокне, максимального контактного давления на границе и изменение показателя преломления в светопроводящей жиле. Изменение температуры во время термоцикла оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) всего волокна и светопроводящей жилы при всех рассматриваемых соотношениях ЗУП. При увеличении процентного соотношения внутреннего слоя наблюдается более нелинейный характер деформационного поведения. Релаксационные переходы в материалах оказывают влияние не только на НДС системы, но и на контактное давление, что связано с непрерывным изменением площади контактного взаимодействия под воздействием температуры. Установлено, что оптимальной является толщина внутреннего ЗУП в диапазоне от 30 до 70 % от общей толщины ЗУП. Требуется дополнительное исследование влияния толщины на волновод вблизи стандартного соотношения толщин ЗУП.

Ключевые слова: анизотропное волокно, численное моделирование, полимерное защитно-упрочняющее покрытие, контактное воздействие, релаксация.

Yu.I. Lesnikova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF A MULTI-LAYER PROTECTIVE COATING ON THE DEFORMATION AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF A PANDA TYPE FIBER

The paper investigates a polarization-maintaining single-mode optical Panda type fiber with a quartz diameter of 80 microns, covered with a two-layer polymer protective coating (PC) with a diameter of 167 microns, which is used to manufacture the sensitive loop of a fiber-optic gyroscope. An intermediate test of the waveguide after fabrication is simulated: a fiber with a tension force of 0.2 N is wound in one row on an aluminum coil and subjected to thermal cycling according to a given law in the operating temperature range $-60 \div 60$ °C. Within the framework of the work, 7 variants of the ratios of the internal and external PC were considered while maintaining the total fiber diameter, taking into account the heterogeneous properties of structural elements, the viscoelastic properties of the PC materials and the contact interaction of the fiber with the coil without taking into account the friction on the mating surfaces. The considered temperature range partially includes relaxation transitions in both PC layers, which leads to the appearance of creep deformation and changes in many physical and mechanical characteristics of the material. The behavior of the PC materials is described by the theory of linear viscoelasticity by means of the Prony model; to take into account the effect of temperature on the properties of the PC materials, the temperature-time analogy described by the Williams-Landell-Ferry equation is used. As a result of numerical experiments, dependences are obtained that describe the evolution of the stress-strain state in the fiber, the maximum contact pressure at the interface, and the change in the refractive index in the light-conducting core. A change in temperature during a thermal cycle affects the stress-strain state (SSS) of the entire fiber and the light-conducting core for all the considered ratios of the PC. With an increase in the percentage of the inner layer, a more non-linear character of deformation behavior is observed. Relaxation transitions in materials affect not only the stress-strain state of the system, but also the contact pressure, which is associated with a continuous change in the contact interaction area under the influence of temperature. It has been found that the optimal thickness of the internal memory is in the range from 30 to 70% of the total thickness of the memory. An additional study of the effect of the thickness on the waveguide near the standard ratio of the thicknesses of the PC is required.

Keywords: maintaining optical fiber, numerical modeling, polymer protective coating, contact interaction, relaxation.

Введение

В настоящее время оптические волокна применяются почти во всех сферах науки и техники. В сфере телекоммуникаций они позволяют передавать сигнал на большие расстояния без потерь и с высокой скоростью [1–3]. Оптоволокно используется для доставки света в труднодоступные места, а также для декоративного и ландшафтного освещения [4–6]. Другой сферой применения является измерение и фиксация параметров систем исследования, анализа и мониторинга состояния объектов исследования [7–9]. С их помощью можно измерять температуру [10–15], деформацию [12–17], давление [18–20], изгиб [21; 22], силу тока [23], качество воздуха [24; 25], наличие химических и биологических веществ [26–28], угловую скорость [29–31] и другие параметры. Также оптические волокна нашли применение в реализации высокоточной лазерной резки технических и живых систем [32; 33]. Существует большой набор областей, исследований и производств, в которых световоды разного типа получили широкое распространение: авиация [34–36], строительство [5; 13; 37], недропользование [15; 38], медицина [28; 33; 39; 40] и т.д. Этому способствуют их универсальные характеристики: малые габариты и масса, устойчивость к электромагнитным помехам, низкое энергопотребление, устойчивость к агрессивным средам, способность работать в широком диапазоне температур.

При этом можно отметить, что одной из самых активно развивающихся сфер использования оптических волокон является их внедрение в опто-

волоконные датчики (ОВД) в качестве чувствительного элемента. В ОВД используют разные типы волокон: многомодовые [19], одномодовые [16; 20; 23], специальные (фотонно-кристаллические [41], с полым сердечником [30; 42], сохраняющие поляризацию излучения [27] и другие) или их комбинации [11; 14; 17; 21; 22]. Использование оптических волокон разного типа, отличающихся геометрической конфигурацией и физико-механическими характеристиками материалов, обусловлено необходимостью создания условий для регистрации состояния объекта исследования. Одним из распространенных видов оптических волокон является специальное одномодовое волокно типа Panda, сохраняющее состояние поляризации вводимого в него излучения [43–45]. Существует достаточно большое количество исследований, связанных с оценкой влияния геометрических характеристик [46], физико-механических и эксплуатационных свойств кварцевых стекол [47], параметров технологического процесса производства [48] и т.д. При этом практически все исследования, связанные с определением деформационных и оптических характеристик волокна, рассматриваются в рамках значительных упрощений геометрической конфигурации: без учета геометрии сечения с использованием осредненных свойств, без учета защитно-упрочняющего покрытия (ЗУП) [49; 50], в рамках теории упругости, в узком диапазоне рабочих температур (комнатная температура, термодинамический цикл от 0 до 40 °C и т.д.). Упрощение моделей исследуемого объекта приводит к неточностям и влияет на качественные и количественные законо-

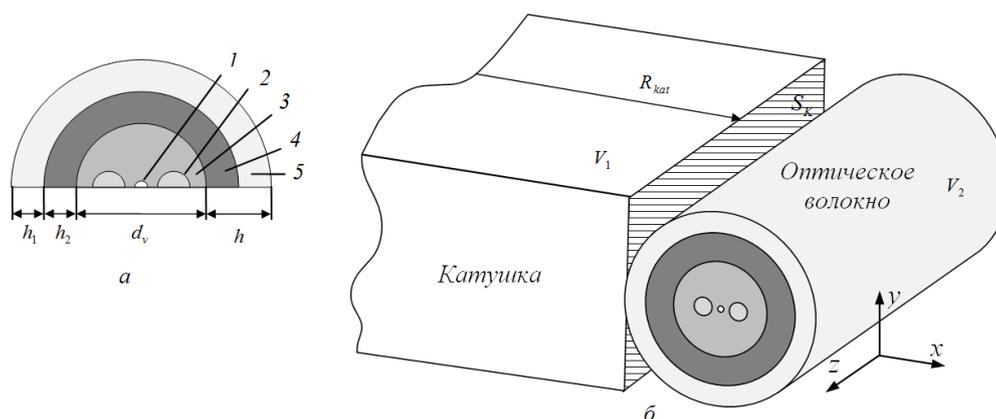


Рис. 1. Расчетная схема: (а) поперечное сечение волокна; (б) объемная модель; 1 – светопроводящая жила, 2 – силовой элемент, 3 – кварцевое стекло, 4 – внутренний ЗУП, 5 – внешний ЗУП

мерности изменения оптических и деформационных характеристик в рамках технологических и эксплуатационных процессов, что сдерживает эффективное развитие производства.

Можно отметить интерес в оценке влияния моделирования поведения волокна типа Panda с учетом ЗУП в условиях эксплуатационных температур $-60 \div 60$ °С. Ранее при исследовании влияния отклонения геометрических параметров конструктивных элементов волокна от проектных значений были выявлены релаксационные переходы в материалах ЗУП, которые вносят определенный вклад в напряженно-деформированное состояние конструкции [51]. В рамках технологического процесса производства и отбраковки готовой продукции, в реальных конструкциях и системах оптические волокна взаимодействуют между собой, с металлическими и неметаллическими элементами. Таким образом, требуется исследование оптического волокна не только в рамках температурных и эксплуатационных нагрузок, но и с учетом механики контактного взаимодействия.

В данной работе выполнено моделирование оптического волокна типа Panda с учетом гетерогенных свойств конструктивных элементов, ЗУП и контактного взаимодействия с алюминиевой катушкой в рамках технологической пробы в широком диапазоне температур от -60 до $+60$ °С.

Объект исследования

Волокно типа Panda производят в России и за рубежом (ПАО «ПНППК» (г. Пермь), ООО «НПК «Оптолинк» (г. Москва), Corning (США), iXBlue Photonics (Франция), Nufern (Канада) и другие). Диаметр волокна по кварцу бывает 80 и 125 мкм. ЗУП бывает одно- и двухслойное, диаметрами от 135 до 500 мкм. Волокно с диаметром 80 мкм используют в целях гироскопии, а волокно с диаметром 125 мкм используют в телекоммуникации и

оптоволоконных датчиках. Завод-изготовитель в документации к волокну указывает только внешний диаметр по ЗУП. Точной информации о диаметре внутреннего ЗУП нет.

В работе исследуется волокно, произведенное на ПАО «ПНППК», с диаметром по кварцу 80 мкм, покрытое двухслойным ЗУП диаметром 167 мкм, которое используется для изготовления чувствительного контура оптоволоконного гироскопа, представляющего собой оптический контур Саньяка в виде многослойной катушки.

Само волокно состоит из чистого кварцевого стекла (основной материал 3) и кварцевых стекол, легированных разными добавками: GeO_2 (светопроводящая жила 1), V_2O_5 и P_2O_5 (силовые стержни 2). Такие добавки существенно изменяют термомеханические свойства стекол (КЛТР, вязкость, температура стеклования, показатель преломления) [52], что приводит к формированию в светопроводящей жиле анизотропии распределения остаточных напряжений после изготовления (рис. 1, а). Разность главных напряжений приводит к появлению в светопроводящей жиле двулучепреломления, при котором показатель преломления зависит от направления распространения света. Этот эффект способствует сохранению состояния поляризации излучения при его прохождении по волокну.

На волокно Panda чаще всего наносят двухслойное акрилатное ультрафиолетом – отверждающееся покрытие. Внутренний слой имеет резиноподобную мягкую структуру, поэтому он легко снимается и не вызывает остаточных напряжений при его наложении. Внутренний ЗУП предназначен для защиты волокна от внешних силовых воздействий и перераспределяет их действие на большую площадь. Внешний слой предотвращает повреждение внутреннего, поэтому он более жесткий и прочный. В работе [53] было показано, что в интервал температур $-60 \div 60$ °С

Варианты соотношения внутреннего и внешнего ЗУП

№ п/п	Внутренний ЗУП	Внешний ЗУП	Внутренний ЗУП	Внешний ЗУП	Обозначение
	h_1 , мкм	h_2 , мкм	h_1 , % от общей толщины ЗУП	h_2 , % от общей толщины ЗУП	
1	4,35	39,15	10	90	h_{10_90}
2	8,7	34,8	20	80	h_{20_80}
3	13,05	30,45	30	70	h_{30_70}
4	25	18,5	57,5	42,5	h_{stand}
5	30,45	13,05	70	30	h_{70_30}
6	34,8	8,7	80	20	h_{80_20}
7	39,15	4,35	90	10	h_{90_10}

частично попадают релаксационные переходы в обоих слоях ЗУП, были получены определяющие соотношения, описывающие поведение материалов ЗУП в заданном диапазоне температур. Внешний ЗУП в диапазоне температур от 10 до 90 °С плавно переходит из застеклованного в высокоэластическое состояние. А внутренний ЗУП в диапазоне температур от –71 до –40 °С, наоборот, возвращается в застеклованное состояние. Это может привести к появлению деформации ползучести. Кроме того, нагрев и охлаждение существенно сказываются на вязкоупругих свойствах защитно-упрочняющих покрытий.

Рассматриваемое волокно имеет идеальную геометрию с параметрами: диаметр волокна – 80 мкм (волокно предназначено для передачи сигнала с длиной волны $\lambda = 1,55$ мкм), диаметр светопроводящей жилы – 6 мкм, диаметр силового стержня – 15 мкм, расстояние между центрами волокна и силового стержня – 15 мкм, диаметр внешнего ЗУП – 167 мкм, диаметр внутреннего ЗУП – 130 мкм (принят в качестве стандартного диаметра). Толщина всего ЗУП h составляет 43,5 мкм с соотношением толщин внешнего и внутреннего слоя 57,5 и 42,5 % соответственно от общей толщины многослойного покрытия.

Так как изготовители не выдают информацию о соотношении толщин ЗУП, было принято решение о более детальном анализе влияния соотношения толщин слоев ЗУП на деформационные и оптические характеристики волокна. Было рассмотрено семь соотношений внутреннего и внешнего слоев при сохранении общей толщины всего ЗУП (таблица).

Постановка задачи

В данной работе рассмотрено контактное взаимодействие анизотропного оптического волокна типа Panda с алюминиевой катушкой в рамках промежуточного испытания волокна после из-

готовления с учетом соотношений внутреннего и внешнего ЗУП (см. табл. 1). Волокно с силой натяжения 0,2 Н наматывается в один ряд на алюминиевую катушку и подвергается термоциклированию по заданному закону. Расчетная схема при стандартном соотношении толщин ЗУП приведена на рис. 1, б, закон изменения температуры – на рис. 2, а. Для выявления релаксационных процессов, проходящих в ЗУП, рассматривается два цикла нагружения в диапазоне $-60 \div 60$ °С с выдержкой при комнатной температуре после второго цикла. Математическая постановка задачи приведена в [51]. При моделировании была принята гипотеза о равномерном изменении температуры по всему объему волокна и катушки, так как скорость изменения температуры в термоцикле мала.

В ANSYS Mechanical APDL строится модель уже изогнутого волокна. Для того чтобы учесть предварительное напряженное состояние, которое складывается из остаточных напряжений, напряжений изгиба и натяжения, в каждом узле модели волокна перед началом расчета задаются начальные упругие деформации.

Остаточные деформации определяются при проведении предварительного моделирования остывания волокна от 2000 °С до комнатной температуры после высокотемпературной вытяжки из заготовки. Расчет проводится по методике, описанной в [54], которая включает последовательное решение краевой задачи нестационарной теплопроводности и краевой задачи об изменении полей напряжений. После вытяжки в волокне формируются поля остаточных напряжений, необходимые для корректной работы волокна (рис. 2, б). Можно заметить, что уровень остаточных напряжений достаточно высокий, наибольших значений достигают напряжения вдоль волокна в силовых стержнях.

Изгибные деформации вычисляются с использованием гипотезы плоских сечений, в каждом узле задаются деформации, равные расстоянию от нейтрального сечения до узла, деленные на сумму

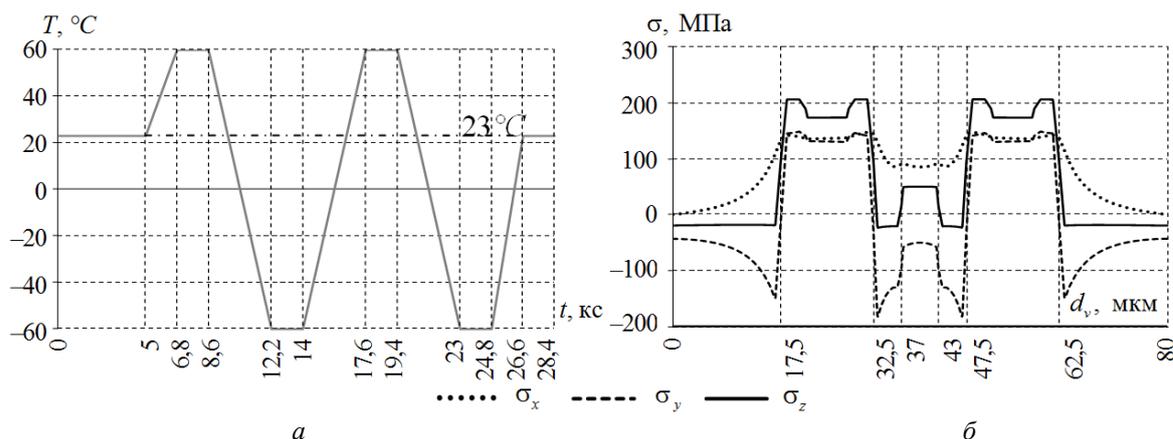


Рис. 2. Цикл изменения температуры (а) и эпюры остаточных напряжений вдоль центрального сечения волокна после вытяжки (б)

радиусов катушки и волокна в ЗУП. Деформации натяжения, одинаковые для всех узлов волокна и ЗУП, вычисляются по закону Гука с учетом гетерогенности поперечного сечения волокна.

При численном моделировании поведение материалов ЗУП описывается теорией линейной вязкоупругости средствами модели Prony, предполагающей для среды наличие одного вязкоупругого оператора. Для учета влияния температуры на свойства материалов ЗУП используется температурно-временная аналогия, описываемая уравнением Вильямса – Ланделла – Ферри. Для внутреннего ЗУП были выбраны следующие параметры модели Вильямса – Ланделла – Ферри: температура приведения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, материальные константы $c_1 = 20,036$ и $c_2 = 32,666$ при 18 членах ряда в модели Prony. Для внешнего ЗУП были выбраны следующие параметры модели Вильямса – Ланделла – Ферри: температура приведения $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, материальные константы $c_1 = 40242,2827$ и $c_2 = 267448,888$ при 60 членах ряда в модели Prony. Отыскание параметров моделей было проведено методом Нелдера – Мида [53].

Численная реализация была выполнена методом конечных элементов в среде ANSYS Mechanical APDL в трехмерной постановке с дискретизацией системы четырехугольными восьмиузловыми конечными элементами с лагранжевой аппроксимацией. Конечно-элементная модель строится с учетом геометрии сечения оптического волокна с уменьшением размера конечных элементов в светопроводящей жиле и вблизи зоны контакта с алюминиевой катушкой. Максимальный объем конечного элемента волокна – 506 мкм^3 , минимальный объем конечного элемента в светопроводящей жиле и вблизи области контакта составляет – $3,5$ и 57 мкм^3 соответственно. Степень дискретизации модели – 57 тыс. узловых неизвест-

ных, включая 53 тыс. в объеме оптического волокна с учетом ЗУП. Решение проводилось по схеме осевой симметрии, исследовался только сектор конструкции с центральным углом $0,5^{\circ}$. Рассматривался контакт без учета трения по сопрягаемым поверхностям, что соответствует реализации в модели только проскальзывания без трения на поверхности сопряжения материалов.

Численное моделирование промежуточного испытания

В рамках промежуточного испытания волокно наматывается на алюминиевую катушку. В качестве предварительного анализа было рассмотрено волокно со стандартным соотношением толщин ЗУП, намотанное на катушку радиусом 5 см . Были получены поля распределения технологических напряжений в волокне в условиях промежуточного испытания при $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ после термоцикла (рис. 3, а). Характерный радиус катушки много больше характерного размера волокна, поэтому действие изгиба проявляется незначительно. Изгиб оказывает влияние на компоненту σ_z , максимальный уровень которой по сравнению с остаточными напряжениями вырос на $33,6\%$. Уровень напряжений σ_x и σ_y остался прежним. Для более яркой иллюстрации эффектов, возникающих в волокне, было принято решение об уменьшении радиуса катушки в 10 раз.

Для катушки радиусом 5 мм были получены поля распределения технологических напряжений в волокне при $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ после термоцикла (рис. 3, б). Характер распределения напряжений по сечению волокна асимметричный, действие изгиба проявляется довольно сильно. Максимальный уровень напряжений по компоненте σ_z по сравнению с остаточными напряжениями вырос более чем в $2,5$ раза – с 205 до 527 МПа .

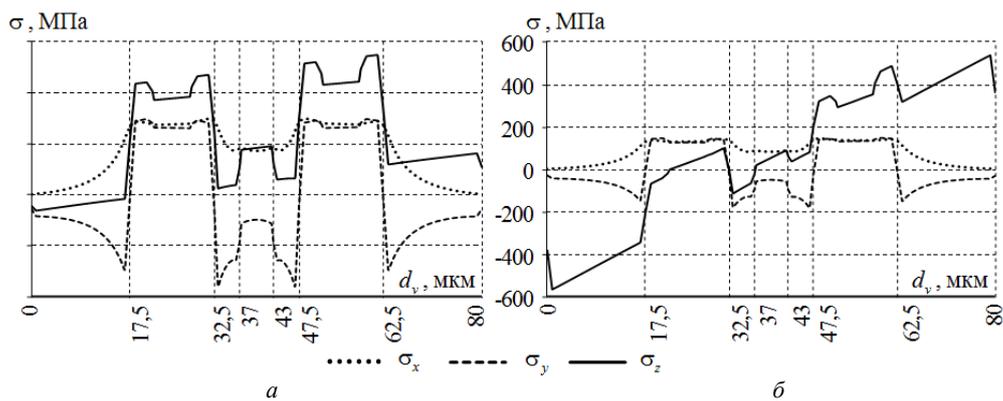


Рис. 3. Эпюры напряжений вдоль центрального сечения волокна после термоцикла: а – $R_{kat} = 5$ см; б – $R_{kat} = 5$ мм

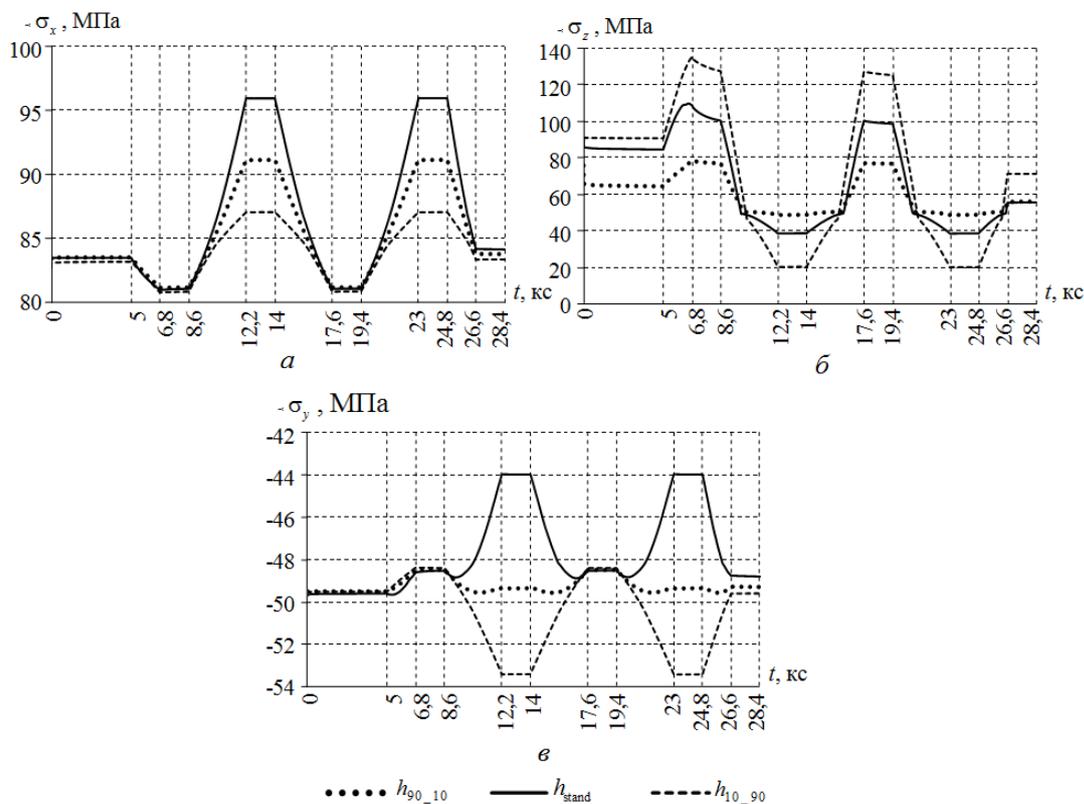


Рис. 4. Эволюция напряжений в центре светопроводящей жилы волокна в зависимости от соотношения толщин ЗУП при $R_{kat} = 5$ мм: а – σ_x , б – σ_z , в – σ_y

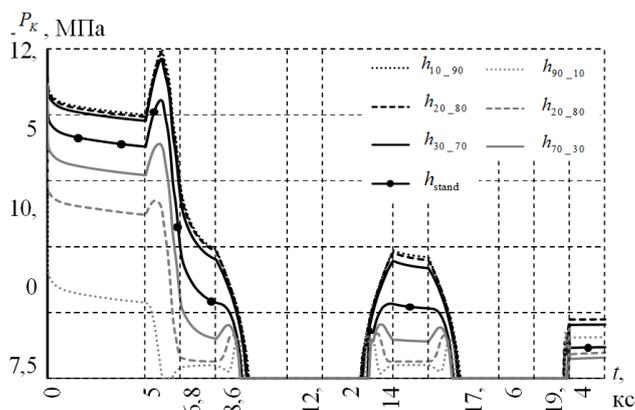


Рис. 5. Эволюция контактного давления в условиях термоцикла

В рамках серии численных экспериментов было рассмотрено семь соотношений толщин ЗУП в соответствии с данными таблицы. Характерные зависимости эволюции компонент тензора напряжений в центре светопроводящей жилы для стандартного и двух пограничных случаев приведены на рис. 4.

Наибольшее влияние на характер изменения компонент σ_x и σ_y оказывает отрицательная температура, разброс значений на выдержке при -60°C для компоненты σ_x составляет $87 \div 96$ МПа (рис. 4, а), для компоненты σ_y $-53 \div -44$ МПа (рис. 4, в). Причем максимальные значения наблюдаются при стандартном соотношении ЗУП. Наибольшее влияние температура оказывает на σ_z (рис. 4, б). На графике наблюдается изменение на всем температурном диапазоне. Наибольшие отклонения параметров происходят на первом участке нагрева до 60°C , разброс значений составляет $78 \div 135$ МПа. Прослеживается нелинейное изменение исследуемых параметров, что связано с релаксационными процессами в ЗУП.

Особый интерес представляет анализ влияния термосилового нагружения и геометрической конфигурации ЗУП на параметры области контакта и оптические характеристики волокна.

Основной характеристикой зоны сопряжения при контакте без учета трения является контактное давление. На рис. 5 показано распределение зависимости максимального контактного давления, которое наблюдается в точке первоначального контакта «волокно – катушка».

Релаксационные переходы в материалах оказывают влияние не только на НДС системы, но и на контактное давление, что связано с непрерывным изменением площади контактного взаимодействия под воздействием температуры. При толщине внешнего ЗУП более 50 % от h наблюдается незначительное влияние h_2 на качественные и количественные закономерности изменения параметров зоны контакта. Материал внешнего ЗУП в меньшей степени воспринимает силовое нагружение, контактное давление распределяется по меньшей площади, чем при стандартном распределении толщин ЗУП.

При толщине внутреннего ЗУП более 50 % от h наблюдается значительное влияние как температуры, так и h_1 на деформирование многослойного покрытия, что приводит к более неравномерному изменению $\max P_K$: появляются зоны значительного снижения параметра, в неблагоприятном случае контактное давление стремится к 0. Данный эффект связан со значительным де-

формированием внутреннего ЗУП и площади контактного взаимодействия при незначительном изменении силового нагружения.

Расхождение контактных поверхностей для разных соотношений толщин ЗУП происходит при разных температурах. В диапазоне температур $2 \div 19^\circ\text{C}$ наблюдается полное раскрытие контактного сопряжения во всех вариантах соотношений толщин ЗУП, что объясняется усадкой алюминиевой катушки. При -60°C определяется максимальное расхождение поверхностей сопряжения, например для стандартного соотношения толщин ЗУП на $8,3$ мкм.

Оценка влияния геометрии системы на условия прохождения сигнала по светопроводящей жиле может быть сделана по одной из основных оптических характеристик, а именно по изменению показателей преломления в двух ортогональных осях распространения света, которые возникают вследствие воздействия асимметричных остаточных напряжений вокруг светопроводящей жилы, инициируемые силовыми стержнями. Напряжения в светопроводящей жиле и изменение показателя преломления связаны следующими соотношениями [55; 56]:

$$\Delta n_x = -C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y - \sigma_z),$$

$$\Delta n_y = -C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x - \sigma_z),$$

где $C_1 = -6,5e-13 \text{ Па}^{-1}$, $C_2 = -4,22e-12 \text{ Па}^{-1}$ – коэффициенты фотоупругости.

На рис. 6 показана эволюция отклонения показателя преломления в центре светопроводящей жилы в условиях термоцикла.

Диаграммы изменения показателя преломления показывают влияние внешних и внутренних факторов деформирования системы, которые приводят к снижению показателя преломления сердцевин относительно волокна в спокойном состоянии. В таких условиях показатель преломления по оси y снижается больше, чем по оси x . Из-за разного соотношения толщин ЗУП эти величины отличаются уже при комнатной температуре. На участках выдержки волокна при -60°C наблюдается значительное влияние соотношения толщин ЗУП на Δn_x , которое при h_{10_90} и h_{90_10} отличается от h_{stand} в 3 и 0,4 раза соответственно. При толстом внешнем ЗУП при температуре ниже -24°C происходит смена знака Δn_x с отрицательного на положительный, что связано с потерей контакта с катушкой, большим влиянием изгиба и температурной деформации, фазовым переходом во внутреннем ЗУП.

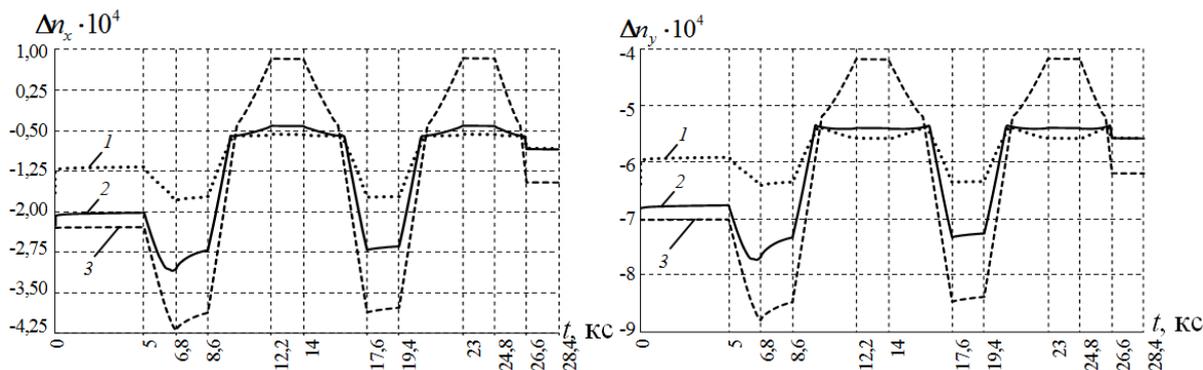


Рис. 6. Эволюция отклонения показателя преломления в центре светопроводящей жилы в условиях термоцикла: *a* – по оси *x*; *б* – по оси *y*: 1 – $h_{90_{10}}$, 2 – h_{stand} , 3 – $h_{10_{90}}$

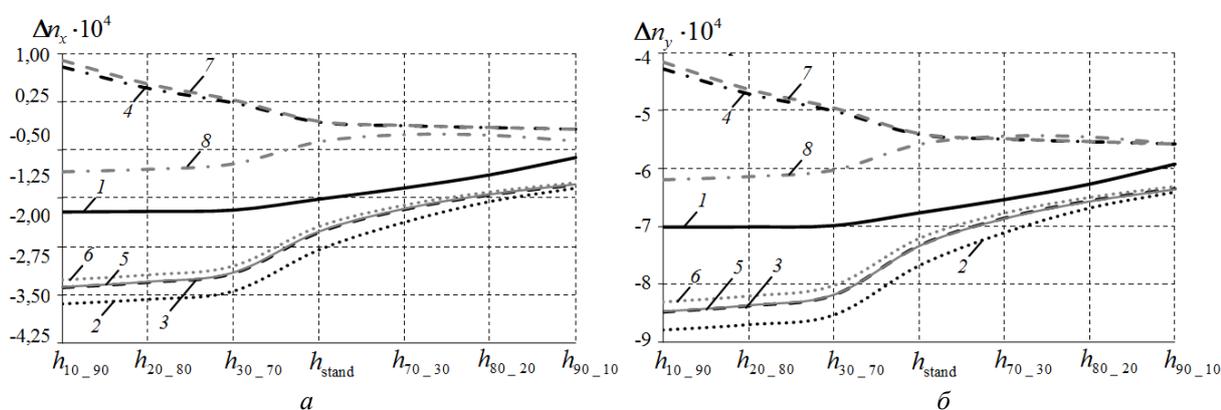


Рис. 7. Отклонения показателя преломления в центре светопроводящей жилы в условиях термоцикла: *a* – по оси *x*, *б* – по оси *y* при: 1 – $t = 5$ кс, $T = 23$ °С, 2 – $t = 6,8$ кс, $T = +60$ °С, 3 – $t = 8,6$ кс, $T = +60$ °С, 4 – $t = 12,2$ кс, $T = -60$ °С, 5 – $t = 17,6$ кс, $T = +60$ °С, 6 – $t = 19,4$ кс, $T = +60$ °С, 7 – $t = 23$ кс, $T = -60$ °С, 8 – $t = 26,6$ кс, $T = 23$ °С

При более толстом внешнем слое тонкая буферная прослойка перестает выполнять свои защитные функции. На изменение Δn_y соотношение толщин ЗУП влияет незначительно, при $h_{10_{90}}$ и $h_{90_{10}}$ отличается от h_{stand} на 22 и 3 % соответственно. На участках выдержки волокна при $+60$ °С наблюдается нелинейное изменение исследуемых параметров, что связано с релаксационными процессами в ЗУП.

На рис. 7 представлены линии, соединяющие одинаковые состояния во всех исследуемых вариантах соотношений ЗУП, которые иллюстрируют стабильность изменения показателей преломления под воздействием температуры.

Меньше всего разброс значений наблюдается при толщине внутреннего ЗУП более 70 %, изменение показателя преломления происходит в пределах $2 \cdot 10^4$. При h_{stand} он не превышает $2,5 \cdot 10^4$. Существенное изменение наблюдается для варианта $h_{10_{90}}$, разброс значений показателей преломле-

ния по осям *x* и *y* составляет не более $5 \cdot 10^4$. Толстая внутренняя оболочка сглаживает воздействие температуры на изменение показателей преломления в светопроводящей жиле.

Выводы

В рамках работы сделано математическое описание термомеханического деформирования оптического волокна типа Panda при промежуточном испытании волокна после изготовления. На основе экспериментальных данных сформулированы определяющие соотношения в вязкоупругой постановке, описывающие поведение полимерных материалов защитно-упрочняющих покрытий. Сделан учет контактного взаимодействия волокна в ЗУП с алюминиевой катушкой без учета трения по сопрягаемым поверхностям. Смоделировано поведение волокна при циклическом изменении температуры в диапазоне $-60 \div +60$ °С с выдержкой при комнатной температуре после второго цикла. Выполнен анализ влияния соотношения толщин

ЗУП без изменения общего диаметра волокна на деформационные и оптические характеристики.

В рамках серии численных экспериментов установлены качественные и количественные закономерности:

- изменение температуры во время термодинамического цикла оказывает влияние на НДС светопроводящей жилы при всех рассматриваемых соотношениях ЗУП. Компонента σ_z изменяется на всем температурном диапазоне, а компоненты σ_x и σ_y – при отрицательных температурах;

- при увеличении процентного соотношения внутреннего слоя наблюдается более нелинейный характер деформационного поведения;

- при работе оптического волокна в условиях больших амплитуд температур происходит постоянное деформирование и изменение оптических характеристик волокна, которые могут сказываться на качестве сигнала;

- разрыв контакта волокна с катушкой происходит при разных температурах в диапазоне $2 \div 19$ °С, что связано с термомеханическими свойствами материалов и процентным соотношением толщин ЗУП;

- оптимальным является соотношение толщин ЗУП в диапазоне от h_{30_70} от h_{70_30} , но требуется дополнительное исследование вблизи стандартного соотношения толщин ЗУП.

Научная новизна результатов исследования заключается в учете вязкоупругих свойств материалов ЗУП, рассмотрении циклического изменения температуры, которое позволяет проследить физику процесса, а также в анализе модели в рамках трехмерной постановки при реализации термомеханического нагружения. Исследование влияния толщин ЗУП на НДС конструкции помогло понять влияние свойств материалов на общую работу волокна в ЗУП.

Список литературы

1. Quantum-secured data transmission in urban fiber-optics communication lines / A.V. Duplinskiy, E.O. Kiktenko, N.O. Pozhar, M.N. Anufriev, R.P. Ermakov, A.I. Kotov, A.V. Brodskiy, R.R. Yunusov, V.L. Kurochkin, A.K. Fedorov, Y.V. Kurochkin // *J. Russ. Laser Res.* – 2018. – Vol. 39. – P. 113–119.
2. Renaudier J., Ghazisaeidi A. Scaling capacity growth of fiber-optic transmission systems using 100+nm ultra-wideband semiconductor optical amplifiers // *J. Lightwave Technol.* – 2019. – Vol. 37. – P. 1831–1838.
3. Winzer P.J., Neilson D. T., Chraplyvy A.R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited] // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26. – P. 24190–24239.

4. Recent progress of fiber shaped lighting devices for smart display applications – A fibertronic perspective / S. Kwon, Y.H. Hwang, M. Nam, H. Chae, H.S. Lee, Y. Jeon, S. Lee, C.Y. Kim, S. Choi, E.G. Jeong, K.C. Choi // *Adv. Mater.* – 2020. – Vol. 32 (5). – P/ 1903488.

5. Design of a hybrid fiber optic daylighting and PV solar lighting system / L. Yuexia, X. Longyu, Y. Jinyue, B. Jinpeng // *Energy Procedia.* – 2018. – Vol. 145. – P. 586–591.

6. Lawless S., Gorthala R. Design and development of a fiber-optic hybrid day-lighting system // *J. Sol. Energy Eng.* – 2018. – Vol. 140 (2). – P. 021012.

7. Pevec S., Donlagić D. Multiparameter fiber-optic sensors: a review // *Opt. Eng.* – 2019. – Vol. 58 (7). – P. 072009.

8. Alemohammad H. Opto-mechanical fiber optic sensors: Research, technology, and applications in mechanical sensing. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 342 p.

9. Review of fiber optic sensors for structural fire engineering / Y. Bao, Y. Huang, M.S. Hoehler, G. Chen // *Sensors.* – 2019. – Vol. 19 (4). – P. 877.

10. New fiber optic sensor for monitoring temperatures in concrete structures during fires / B. Torres Górriz, I. Payá-Zaforteza, P.A. Calderón García, S. Sales Maicas // *Sens. Actuator A Phys.* – 2017. – Vol. 254. – P. 116–125.

11. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film / Y. Wang, Q. Huang, W. Zhu, M. Yang, E. Lewis // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26. – P. 1910–1917.

12. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // *Sens. Actuator A Phys.* – 2019. – Vol. 288. – P. 171–176.

13. Temperature and strain registration by fibre-optic strain sensor in the polymer composite materials manufacturing / V.P. Matveenko, N.A. Kosheleva, I.N. Shardakov, A.A. Voronkov // *Int. J. Smart Nano Mater.* – 2018. – Vol. 9 (2). – P. 99–110.

14. A miniature ultra long period fiber grating for simultaneous measurement of axial strain and temperature / S. Zhang, S. Deng, T. Geng, C. Sun, H. Niu, X. Li, Z. Wang, X. Li, Y. Ma, W. Yang, C. Tong, L. Yuan // *Optics & Laser Technol.* – 2020. – Vol. 126. – P. 106121.

15. Прохоров А.Е., Плехов О.А. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2019. – № 1. – С. 131–139.

16. Kaya M., Esenturk O. Study of strain measurement by fiber optic sensors with a sensitive fiber loop ringdown spectrometer // *Opt. Fiber Technol.* – 2020. – Vol. 54. – P. 102070.

17. Hybrid MEFPI/FBG sensor for simultaneous measurement of strain and magnetic field / M. Chen, Y. Zhao, R. Lv, F. Xia // *Opt. Fiber Technol.* – 2017. – Vol. 39. – P. 32–36.

18. Distributed optical fiber pressure sensors / L. Schenato, A. Galtarossa, A. Pasuto, L. Palmieri // *Opt. Fiber Technol.* – 2020. – Vol. 58. – P. 102239.

19. Chen W.P., Wang D.N., Xu B. Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 368.

20. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer for gas pressure sensing / Y. Liu, H. Lin, Y. Dai, A. Zhou, L. Yuan // *IEEE Sens. J.* – 2018. – Vol. 18 (19). – P. 8012–8016.

21. A miniature SMS-LPG bending sensor with high sensitivity based on multimode fiber embedded-LPG / S. Zhang, S. Deng, Z. Wang, C. Sun, X. Chen, Y. Ma, L. Zhao, C. Lu, T. Geng, W. Yang, L. Yuan // *Sens. Actuator A Phys.* – 2019. – Vol. 295. – P. 31–36.
22. Temperature-independent curvature sensor based on in-fiber Mach–Zehnder interferometer using hollow-core fiber / S. Marrujo-García, I. Hernández-Romano, M. Torres-Cisneros, D. May-Arrijoja, V. Minkovich, D. Monzón-Hernández // *J. Lightwave Technol.* – 2020. – Vol. 38. – P. 4166–4173.
23. Янукович Т.П., Поляков А.В. Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна // *Приборы и методы измерений.* – 2019. – № 3. – С. 243–252.
24. Su J. Portable and sensitive air pollution monitoring // *Light Sci. Appl.* – 2018. – Vol. 7. – P. 3.
25. Indoor air pollution and the contribution of biosensors / E. Eltzov, A.L. De Cesarea, A.Y.K. Low, R.S. Marks // *The EuroBiotech Journal.* – 2019. – Vol. 3 (1). – P. 19–31.
26. Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nanofabrications and applications / M. Yin, B. Gu, Q.-F. An, C. Yang, Y.L. Guan, K.-T. Yong // *Coord. Chem. Rev.* – 2018. – Vol. 376. – P. 348–392.
27. Optical fiber hydrogen sensor with single Sagnac interferometer loop based on vernier effect / B. Wu, C. Zhao, B. Xu, Y. Li // *Sens. Actuator B Chem.* – 2018. – Vol. 255 (3). – P. 3011–3016.
28. Sun D., Ran Y., Wang G. Label-free detection of cancer biomarkers using an in-line taper fiber-optic interferometer and a fiber Bragg grating // *Sensors.* – 2017. – Vol. 7 (11). – P. 2559.
29. A Compact four-axis interferometric fiber optic gyroscope based on multiplexing for space application / J. Jin, J. He, N. Song, K. Ma, L. Kong // *J. Lightwave Technol.* – 2020. – Vol. 38 (23). – P. 6655–6663.
30. Morris T.A., Dignonnet M.J.F. Broadened-laser-driven polarization-maintaining hollow-core fiber optic gyroscope // *J. Lightwave Technol.* – 2020. – Vol. 38 (4). – P. 905–911.
31. Chopra K.N. *Optoelectronic Gyroscopes.* Progress in Optical Science and Photonics. Springer. – 2021. – Vol. 11. – 138 p.
32. Hecht J. High-power fiber lasers // *Opt. Photon. News.* – 2018. – Vol. 29 (10). – P. 30–37.
33. Taccheo S. Fiber lasers for medical diagnostics and treatments: state of the art, challenges and future perspectives // *Proc. SPIE, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVII.* – 2017. – P. 10058.
34. Hybrid fiber optic sensor systems in structural health monitoring in aircraft structures / K. Bednarska, P. Sobotka, T.R. Woliński, O. Zakręcka, W. Pomianek, A. Nocoń, P. Lesiak // *Materials.* – 2020. – Vol. 13 (10). – P. 2249.
35. Pérez-Ocón F., Pozo A.M., Rabaza O. New obstruction lighting system for aviation safety // *Eng. Struct.* – 2017. – Vol. 132. – P. 531–539.
36. FMCW linear cell radar interference mitigation through control of signal delay in radio-over-fiber links / T. Miura, K. Okuda, A. Kanno, P.T. Dat, N. Shibagaki, K. Kashima, Y. Sato, M. Fujii, R. Haramoto, K. Uchida, T. Hayashi, S.M. Idrus, A. Hamzah, S. Ambran, F. Iqbal, T. Kawanishi // *IEICE Electronics Express.* – 2020. – Vol. 17 (15). – P. 20200228.
37. Wang H., Jiang L., Xiang P. Priority design parameters of industrialized optical fiber sensors in civil engineering // *Optics & Laser Technol.* – 2018. – Vol. 100. – P. 119–128.
38. Bzówka J., Grygierek M., Rokitoski P. Experimental investigation using distributed optical fiber sensor measurements in unbound granular layers // *Eng. Struct.* – 2021. – Vol. 231. – P. 111767.
39. Zhou J., Jokerst J.V. Photoacoustic imaging with fiber optic technology: A review // *Photoacoustics.* – 2020. – Vol. 20. – P. 100211.
40. Оценка эффективности внутриоральных баллонов с волоконнооптическим датчиком / Л.А. Бокерия, М.М. Алшибая, О.А. Коваленко, Л.Н. Румянцев, М.В. Махалин, З.М. Чеишвили, М.М. Амирбеков, А.И. Корольков, А.Р. Калов // *Клиническая физиология кровообращения.* – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 175–182.
41. A review of photonic crystal fiber sensor applications for different physical quantities / T. Zhang, Y. Zheng, C. Wang, Z. Mu, Y. Liu, J. Lin // *Appl. Spectrosc. Rev.* – 2018. – Vol. 53 (6). – P. 486–502.
42. Kuruba N., Lu T. Hollow fiber coupler sensor // *Sensors.* – 2019. – Vol. 19 (4). – P. 806.
43. Multi-parameter sensor based on single long period grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain / F. Esposito, A. Srivastava, A. Iadicicco, S. Campopiano // *Opt. & Laser Technol.* – 2019. – Vol. 113. – P. 198–203.
44. Monitoring the failure forms of a composite laminate system by using panda polarization maintaining fiber Bragg gratings / X. Zhang, R. Chen, A. Wang, Y. Xu, Y. Jiang, H. Ming, W. Zhao // *Opt. Exp.* – 2019. – Vol. 27 (13). – P. 17571–17580.
45. Metallic structure functional sensor based on embedded Panda fiber by ultrasonic additive manufacturing / X. He, C. Ma, X. Wang, Z. Wang, F. Jiang, L. Yuan // *Appl. Opt.* – 2020. – Vol. 59 (16). – P. 4880–4887.
46. High extinction ratio elliptical core Panda-type polarization-maintaining fiber coil / H. Li, X. Li, J. Wang, M. Rochette, H. Yang // *Opt. Lett.* – 2021. – Vol. 46(17). – P. 4276–4279.
47. Effects of composition and phase relations on mechanical properties and crystallization of silicate glasses / E. Kilinc, A.M.T. Bell, P.A. Bingham, R.J. Hand // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2021. – Vol. 104. – P. 3921–3946.
48. Glass and process development for the next generation of optical fibers: A Review / J. Ballato, H. Ebendorff-Heidepriem, J. Zhao, L. Petit, J. Troles // *Fibers.* – 2017. – Vol. 5 (1). – P. 11.
49. Есипенко И.А., Лыков Д.А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и ее экспериментальная верификация // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение.* – 2017. – № 5. – С. 31–46.
50. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях / К.С. Галягин, М.А. Ошивалов, М.А. Савин, Ю.А. Селянинов // *Известия высших учеб-*

ных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 978–984.

51. Lesnikova Yu.I., Trufanov A.N., Smetannikov O.Yu. Исследование оптико-механических характеристик волокна в условиях термоцикла // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – Т. 20. № 6 (2). – С. 255–260.

52. Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.П. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов: справочник. – Л.: Наука, 1973–1987. – Т. 1–5.

53. Труфанов А.Н. Идентификация определяющих соотношений полимерных материалов в широком температурном диапазоне // XXI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам: материалы, Алушта, 24–31 мая 2019 г. – М.: Изд-во МАИ, 2019. – С. 355–358.

54. Trufanov A.N., Trufanov N.A., Semenov N.V. Numerical analysis of residual stresses in preforms of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers in view of technological imperfections of the doped zone geometry // Opt. Fiber Technol. – 2016. – Vol. 31. – P. 83–91.

55. Черненко В.Д. Оптомеханика волоконных световодов. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.

56. Park Y., Paek U.C., Kim D.Y. Characterization of a stress-applied polarization-maintaining (PM) fiber through photoelastic tomography // J. Lightwave Technol. – 2003. – Vol. 21 (4). – P. 997–1004.

References

1. Duplinskiy A.V., Kiktenko E.O., Pozhar N.O., Anufriev M.N., Ermakov R.P., Kotov A.I., Brodskiy A.V., Yunusov R.R., Kurochkin V.L., Fedorov A.K., Kurochkin Y.V. Quantum-secured data transmission in urban fiber-optics communication lines. *Journal Russ. Laser Res.*, 2018, vol. 39, pp. 113–119.

2. Renaudier J., Ghazisaeidi A. Scaling capacity growth of fiber-optic transmission systems using 100+nm ultra-wideband semiconductor optical amplifiers. *Journal Lightwave Technol.*, 2019, vol. 37, pp. 1831–1838.

3. Winzer P.J., Neilson D. T., Chraplyvy A.R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited]. *Opt. Express.*, 2018, vol. 26, pp. 24190–24239.

4. Kwon S., Hwang Y.H., Nam M., Chae H., Lee H.S., Jeon Y., Lee S., Kim C.Y., Choi S., Jeong E.G., Choi K.C. Recent progress of fiber shaped lighting devices for smart display applications – A fibertronic perspective. *Adv. Mater.*, 2020, vol. 32(5), p. 1903488.

5. Yuexia L., Longyu X., Jinyue Y., Jin-Peng B. Design of a hybrid fiber optic daylighting and PV solar lighting system. *Energy Procedia.*, 2018, vol. 145, pp. 586–591.

6. Lawless S., Gorthala R. Design and development of a fiber-optic hybrid day-lighting system. *Journal Sol. Energy Eng.*, 2018, vol. 140 (2), p. 021012.

7. Pevec S., Donlagić D. Multiparameter fiber-optic sensors: a review. *Opt. Eng.*, 2019, vol. 58(7), p. 072009.

8. Alemohammad H. Opto-mechanical fiber optic sensors: Research, technology, and applications in mechanical sensing. Butterworth-Heinemann, 2018, 342 p.

9. Bao Y., Huang Y., Hoehler M.S., Chen G. Review of fiber optic sensors for structural fire engineering. *Sensors.*, 2019, vol. 19 (4), p. 877.

10. Torres Górriz B., Payá-Zaforteza I., Calderón García P.A., Sales Maicas S. New fiber optic sensor for monitoring temperatures in concrete structures during fires. *Sens. Actuator A Phys.*, 2017, vol. 254, pp. 116–125.

11. Wang Y., Huang Q., Zhu W., Yang M., Lewis E. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film. *Opt. Express.*, 2018, vol. 26, pp. 1910–1917.

12. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sens. Actuator A Phys.*, 2019, vol. 288, pp. 171–176.

13. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Shardakov I.N., Voronkov A.A. Temperature and strain registration by fibre-optic strain sensor in the polymer composite materials manufacturing. *Int. Journal Smart Nano Mater.*, 2018, vol. 9(2), pp. 99–110.

14. Zhang S., Deng S., Geng T., Sun C., Niu H., Li X., Wang Z., Li X., Ma Y., Yang W., Tong C., Yuan L. A miniature ultra long period fiber grating for simultaneous measurement of axial strain and temperature. *Optics & Laser Technol.*, 2020, vol. 126, p. 106121.

15. Prokhorov A.E., Plekhov O.A. Razrabotka sistemy monitoringa nestatsionarnykh temperatur i deformatsii vo vlagonasyschennom grunte v usloviakh fazovogo perekhoda na baze optovolokonnykh datchikov [Development of a monitoring system for unsteady temperatures and deformations in moisture-saturated soil under phase transition conditions based on fiber-optic sensors]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2019, no. 1, pp. 131–139.

16. Kaya M., Esenturk O. Study of strain measurement by fiber optic sensors with a sensitive fiber loop ringdown spectrometer. *Opt. Fiber Technol.*, 2020, vol. 54, p. 102070.

17. Chen M., Zhao Y., Lv R., Xia F. Hybrid MEFPI/FBG sensor for simultaneous measurement of strain and magnetic field. *Opt. Fiber Technol.*, 2017, vol. 39, p. 32–36.

18. Schenato L., Galtarossa A., Pasuto A., Palmieri L. Distributed optical fiber pressure sensors. *Opt. Fiber Technol.*, 2020, vol. 58, p. 102239.

19. Chen W.P., Wang D.N., Xu B. Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, p. 368.

20. Liu Y., Lin H., Dai Y., Zhou A., Yuan L. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer for gas pressure sensing. *IEEE Sens. Journal*, 2018, vol. 18(19), pp. 8012–8016.

21. Zhang S., Deng S., Wang Z., Sun C., Chen X., Ma Y., Zhao L., Lu C., Geng T., Yang W., Yuan L. A miniature SMS-LPG bending sensor with high sensitivity based on multimode fiber embedded-LPG. *Sens. Actuator A Phys.*, 2019, vol. 295, pp. 31–36.

22. Marrujo-García S., Hernández-Romano I., Torres-Cisneros M., May-Arrijoja D., Minkovich V., Monzón-Hernández D. Temperature-independent curvature sensor based on in-fiber Mach-Zehnder interferometer using hollow-core fiber. *Journal Lightwave Technol.*, 2020, vol. 38, pp. 4166–4173.

23. Ianukovich T.P., Poliakov A.V. Modelirovanie raspredelennogo izmeritel'ia sily toka na osnove deformatsii

opticheskogo volokna [Modeling of distributed current meter based on optical fiber deformation]. *Pribory i metody izmerenii*, 2019, no. 3, pp. 243–252.

24. Su J. Portable and sensitive air pollution monitoring. *Light Sci. Appl.*, 2018, vol. 7, p. 3.

25. Eltzov E., De Cesarea A.L., Low A.Y.K., Marks R.S. Indoor air pollution and the contribution of biosensors. *The EuroBiotech Journal*, 2019, vol. 3(1), pp. 19–31.

26. Yin M., Gu B., An Q.-F., Yang C., Guan Y.L., Yong K.-T. Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications. *Coord. Chem. Rev.*, 2018, vol. 376, pp. 348–392.

27. Wu B., Zhao C., Xu B., Li Y. Optical fiber hydrogen sensor with single Sagnac interferometer loop based on vernier effect. *Sens. Actuator B Chem.*, 2018, vol. 255 (3), pp. 3011–3016.

28. Sun D., Ran Y., Wang G. Label-free detection of cancer biomarkers using an in-line taper fiber-optic interferometer and a fiber Bragg grating. *Sensors*, 2017, vol. 7(11), p. 2559.

29. Jin J., He J., Song N., Ma K., Kong L. A Compact four-axis interferometric fiber optic gyroscope based on multiplexing for space application. *Journal Lightwave Technol.*, 2020, vol. 38 (23), pp. 6655–6663.

30. Morris T.A., Digonnet M.J.F. Broadened-laser-driven polarization-maintaining hollow-core fiber optic gyroscope. *Journal Lightwave Technol.*, 2020, vol. 38 (4), pp. 905–911.

31. Chopra K.N. Optoelectronic Gyroscopes. *Progress in Optical Science and Photonics*. Springer, 2021, vol 11, 138 p.

32. Hecht J. High-power fiber lasers. *Opt. Photon. News.*, 2018, vol. 29(10), pp. 30–37.

33. Taccheo S. Fiber lasers for medical diagnostics and treatments: state of the art, challenges and future perspectives. *Proc. SPIE, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVII*, 2017, p. 10058.

34. Bednarska K., Sobotka P., Woliński T.R., Zakręcka O., Pomianek W., Nocoń A., Lesiak P. Hybrid fiber optic sensor systems in structural health monitoring in aircraft structures. *Materials*, 2020, vol. 13(10), p. 2249.

35. Pérez-Ocón F., Pozo A.M., Rabaza O. New obstruction lighting system for aviation safety. *Eng. Struct.*, 2017, vol. 132, pp. 531–539.

36. Miura T., Okuda K., Kanno A., Dat P.T., Shibagaki N., Kashima K., Sato Y., Fujii M., Haramoto R., Uchida K., Hayashi T., Idrus S.M., Hamzah A., Ambran S., Iqbal F., Kawanishi T. FMCW linear cell radar interference mitigation through control of signal delay in radio-over-fiber links. *IEICE Electronics Express*, 2020, vol. 17(15), pp. 20200228.

37. Wang H., Jiang L., Xiang P. Priority design parameters of industrialized optical fiber sensors in civil engineering. *Optics & Laser Technol.*, 2018, vol. 100, pp. 119–128.

38. Bzówka J., Grygierek M., Rokitowski P. Experimental investigation using distributed optical fiber sensor measurements in unbound granular layers. *Eng. Struct.*, 2021, vol. 231, pp. 111767.

39. Zhou J., Jokerst J.V. Photoacoustic imaging with fiber optic technology: A review. *Photoacoustics*, 2020, vol. 20, p. 100211.

40. Bokeriia L.A., Alshibaia M.M., Kovalenko O.A., Rumiantsev L.N., Makhalin M.V., Cheishvili Z.M., Amirbekov M.M., Korol'kov A.I., Kalov A.R. Otsenka effektivnosti vnutriaortal'nykh ballonov s volokonnoopticheskim datchikom. *Klinicheskaiia fiziologiia krovoobrashcheniia*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 175–182.

41. Zhang T., Zheng Y., Wang C., Mu Z., Liu Y., Lin J. A review of photonic crystal fiber sensor applications for different physical quantities. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2018, vol. 53(6), pp. 486–502.

42. Kuruba N., Lu T. Hollow fiber coupler sensor. *Sensors*, 2019, vol. 19(4), p. 806.

43. Esposito F., Srivastava A., Iadicicco A., Campopiano S. Multi-parameter sensor based on single long period grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain. *Opt. & Laser Technol.*, 2019, vol. 113, pp. 198–203.

44. Zhang X., Chen R., Wang A., Xu Y., Jiang Y., Ming H., Zhao W. Monitoring the failure forms of a composite laminate system by using panda polarization maintaining fiber Bragg gratings. *Opt. Exp.*, 2019, vol. 27(13), pp. 17571–17580.

45. He X., Ma C., Wang X., Wang Z., Jiang F., Yuan L. Metallic structure functional sensor based on embedded Panda fiber by ultrasonic additive manufacturing. *Appl. Opt.*, 2020, vol. 59(16), pp. 4880–4887.

46. Li H., Li X., Wang J., Rochette M., Yang H. High extinction ratio elliptical core Panda-type polarization-maintaining fiber coil. *Opt. Lett.*, 2021, vol. 46(17), pp. 4276–4279.

47. Kilinc E., Bell A.M.T., Bingham P.A., Hand R.J. Effects of composition and phase relations on mechanical properties and crystallization of silicate glasses. *Journal Am. Ceram. Soc.*, 2021, vol. 104, pp. 3921–3946.

48. Ballato J., Ebendorff-Heidepriem H., Zhao J., Petit L., Troles J. Glass and process development for the next generation of optical fibers: A Review. *Fibers*, 2017, vol. 5(1), p. 11.

49. Esipenko I.A., Lykov D.A. Matematicheskaiia model' teplovogo dreifa volokonno-opticheskogo giroskopa i ee eksperimental'naia verifikatsiia [Mathematical model of fiber optic gyroscope thermal drift and its experimental verification]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroenie*, 2017, no. 5, pp. 31–46.

50. Komp'iuternaia model' pogreshnostei vykhodnogo signala volokonno-opticheskogo giroskopa pri vneshnikh vozdeistviiakh [Computer model of fiber-optic gyroscope output errors under external influences] K.S. Galiagin, M.A. Oshivalov, M.A. Savin, Iu.A. Selianinov. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 12, pp. 978–984.

51. Lesnikova Iu.I., Trufanov A.N., Smetannikov O.Iu. Issledovanie optiko-mekhanicheskikh kharakteristik volokna v usloviakh termotsikla [Study of optical and mechanical characteristics of fibers under thermocycle conditions]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, vol. 2(2), no. 6(2), pp. 255–260.

52. Mazurin O.V., Strel'tsina M.V., Shvaiko-Shvaikovskaia T.P. Svoistva stekol i stekloobrazuiushchikh rasplavov: spravochnik [Properties of glasses and glass-forming melts]. Leningrad: Nauka, 1973–1987, vol. 1–5.

53. Trufanov A.N. Identifikatsiia opredel'aiu-shchikh sootnoshenii polimernykh materialov v shirokom temperaturnom diapazone [Identification of the defining ratios of polymeric materials over a wide temperature range]. *XXI Mezhdunarodnaia konferentsiia po vychislitel'noi mekhanike i sovre-mennym prikladnym programmnym sistemam: materialy*. Moscow: Izdatelstvo MAI, 2019, pp. 355–358.

54. Trufanov A.N., Trufanov N.A., Semenov N.V. Numerical analysis of residual stresses in preforms of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers in view of technological imperfections of the doped zone geometry. *Opt. Fiber Technol.*, 2016, vol. 31, pp. 83–91.

55. Chernenko V.D. Optomekhanika volokonnykh svetovodov [Optomechanics of fiber light guides]. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2010, 291 p.

56. Park Y., Paek U.C., Kim D.Y. Characterization of a stress-applied polarization-maintaining (PM) fiber through photoelastic tomography. *Journal Lightwave Technol.*, 2003, vol. 21(4), pp. 997–1004.

Поступила: 15.01.2022

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

Сведения об авторе

Лесникова Юлия Игоревна (Пермь, Россия) – ведущий инженер кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: ulesig@gmail.com).

About the author

Yulia I. Lsnikova (Perm, Russian Federation) – Lead Engineer of Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ulesig@gmail.com).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (грант № 20-48-596009).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад. 100 %.