

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛА

© 2018 Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, О.Ю. Сметанников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Статья поступила в редакцию 07.12.2018

В работе методами математического моделирования описана эволюция напряженно деформированного состояния в анизотропном оптическом волокне типа Panda в условиях контактного взаимодействия волокна и катушки при однорядной силовой намотке и циклическом изменении температуры. Методом конечных элементов построен конечномерный дискретный аналог. Выполнены многовариантные вычислительные эксперименты, в которых варьировались диаметр катушки и отклонения геометрии поперечного сечения волокна типа Panda. Получены зависимости описывающие эволюции напряженно-деформированного состояния в волокне, показателя преломления и двулучепреломления в светопроводящей жиле. Исследовано влияние отклонений геометрии поперечного сечения волокна типа Panda на оптические характеристики. Установлено, что для катушек малого диаметра характерно нелинейное изменение исследуемых параметров при высоких температурах, что связано с релаксационными процессами в защитно-упрочняющем покрытии волокна.

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 16-48-590660 p_a.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве чувствительных элементов некоторых современных датчиков физических величин используются специальные типы оптических волокон, изготовленных из легированных кварцевых стекол [1-3]. Для защиты световода от внешней среды и механических воздействий используют полимерные покрытия. В одном из вариантов исполнения такого защитно-упрочняющего покрытия (ЗУП) на волокно наносят два слоя УФ-отверждаемого полимера (рис.1). Внутренний слой покрытия при комнатной температуре находится в высокоэластическом релаксационном состоянии, его задача уменьшить влияние силовых воздействий (изгиб, поперечная сила и др.) на оптоволокно. Для защиты относительно мягкого первичного покрытия от механических воздействий и влияния внешней среды наносят второй слой, который при комнатной температуре находится в стеклообразном состоянии.

К специальным оптическим волокнам, используемым в составе различных измерительных

Сметанников Олег Юрьевич, доктор технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики. E-mail: sou2009@mail.ru

Труфанов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики. E-mail: ant@pstu.ru

Лесникова Юлия Игоревна, аспирант кафедры вычислительной математики и механики.

E-mail: ulesig@gmail.com

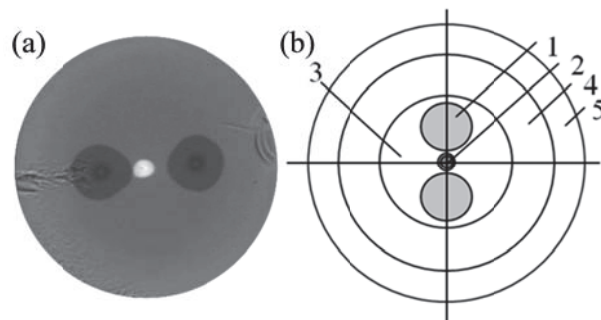


Рис. 1. Поперечное сечение анизотропного оптического волокна типа Panda.

(а) Фото и (б) схема: 1 – силовой элемент, 2 – светопроводящая жила, 3 – основной материал (кварцевое стекло), 4 – внутренний ЗУП, 5 – внешний ЗУП

комплексов, систем навигации на основе оптоволоконных гироскопов, систем мониторинга состояния строительных конструкций и др., предъявляются жесткие требования по корректной работе изделий в заданном эксплуатационном диапазоне температур. Перечислим основные факторы, влияющие на оптические характеристики волокна в условиях нарушения термостатики.

Главный вклад в изменение поляризации светопроводящей жилы при колебаниях температуры вносит гетерогенность кварцевой части волокна (сочетание отличающихся КЛТР с приблизительно одинаковыми упругими свойствами).

Второй по значимости фактор – существенное отличие КЛТР материалов ЗУП и кварцевого

стекла. Несмотря на большую податливость внутреннего слоя ЗУП, в стесненных условиях он способен передавать заметные дополнительные температурные напряжения на светопроводящую жилу.

Помимо термоупругих напряжений и деформаций необходимо также учитывать вязкоупругие эффекты, связанные, в первую очередь, с релаксационными переходами в полимерах ЗУП в эксплуатационном температурном диапазоне, которые сопровождаются изменением податливости материала на несколько порядков, и, как следствие, скачкообразным изменением степени поляризации.

Еще одной причиной нештатного изменения оптических свойств может стать несовершенство технологических процессов, приводящее к отклонениям геометрических параметров конструктивных элементов от проектных значений [4, 5]. В связи с этим на некоторых технологических этапах производства происходит контроль соответствия параметров изделия проектным значениям. В рамках одного из таких испытаний волокно с натягом наматывается на алюминиевую катушку и подвергается термоциклированию, во время которого контролируются оптические характеристики. Влияние силовой намотки волокна на катушку без учета защитного покрытия и контакта с катушкой было рассмотрено в работах [6, 7]. В статье [8] выполнен анализ с учетом контактного воздействия на волокно в защитно-упрочняющем покрытии при комнатной температуре и без учета несовершенства геометрии анизотропного волокна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе методами математического моделирования выполнено исследование влияния термосилового воздействия на напряженно-деформированное состояние в анизотропном волокне и на его оптические характеристики, при однорядной силовой намотке на алюминиевую катушку, с учетом перечисленных во введении факторов, в том числе, релаксационных процессов протекающих в полимерных защитно-упрочняющих покрытиях при циклическом изменении температуры по заданному закону в диапазоне от -60 до 60 °С (рис. 2) и отклонений центра светопроводящей жилы от центра волокна.

Расчетная схема контактного взаимодействия катушки и волокна приведена на рис. 3. Для учета остаточных напряжений в анизотропном волокне типа Panda сформированных после высокотемпературной вытяжки использовался подход, описанный в [9]. Таким образом, на первом этапе были получены поля остаточных деформаций, которые были использованы на втором этапе в качестве начальных условий.

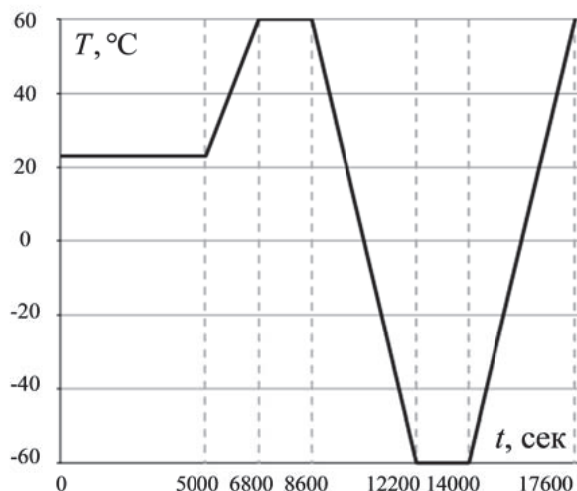


Рис. 2. Цикл изменения температуры

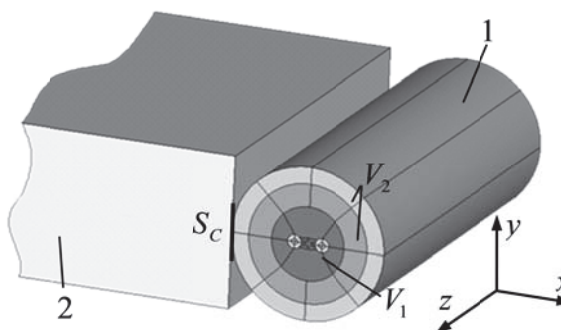


Рис. 3. Расчетная схема:

1 – оптическое волокно типа Panda, 2 – катушка, V_1 – объем волокна, V_2 – объем ЗУП, S_c – контактная поверхность

Математическая постановка описанной задачи включает в себя уравнения равновесия

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = 0, \quad \bar{x} \in V, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}$ – тензор напряжений, V – расчетный объём, \bar{x} – радиус-вектор произвольной точки расчетного объёма.

Геометрические соотношения с учетом малости деформаций

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T), \quad \bar{x} \in V, \quad (2)$$

где $\hat{\varepsilon}$ – тензор деформаций, \bar{u} – вектор перемещений.

В качестве физических соотношений для конструктивных элементов волокна, состоящих из легированных кварцевых стекол, использовался обобщенный закон Гука. Учитывая, что упругие характеристики кварцевого стекла в рассматриваемом диапазоне эксплуатационных температур изменяются незначительно [10], была принята гипотеза, что они не зависят от температуры

$$\hat{\sigma} = \lambda I_1 (\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2G \hat{\varepsilon}, \quad \bar{x} \in V, \quad (3)$$

где λ – параметры Ламе, G – модуль сдвиговой деформации, $I_1(\hat{\epsilon})$ – первый инвариант тензора деформаций, \hat{I} – единичный тензор.

Для полимеров ЗУП использовались физические соотношения, соответствующие линейной вязкоупругой модели [11] с аппроксимацией модуля релаксации суммой экспонент

$$\hat{\sigma} = K\Delta\hat{I} + 2\int_0^t G(t-\tau)d(\hat{\epsilon}(\tau) - 1/3\Delta(\tau)\hat{I}), \quad (4)$$

где Δ – объемная деформация, K – модуль объемного сжатия, $G(t)$ функция сдвиговой релаксации:

$$G(t) = G_0 \left[C_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G} C_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right], \quad (5)$$

где G_0 – мгновенный модуль, C_i^G – экспериментальные коэффициенты, n_G – количество членов экспоненциального ряда, τ_i^G – времена релаксации. При учете влияния температуры на свойства материала используется температурно-временная аналогия, при этом для вычисления приведенных времен применяется коэффициент температурно-временного сдвига, получаемый по формуле Вильямса-Ланделла-Ферри

$$\lg a_T = \frac{C_1^T (T - T_b)}{C_2^T + (T - T_b)}, \quad (6)$$

где C_1^T, C_2^T, T_b – экспериментальные коэффициенты.

Граничные условия в перемещениях и напряжениях

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \mathbf{U}, \quad \vec{x} \in S_u, \\ \hat{\sigma} \cdot \vec{n} &= \mathbf{P}, \quad \vec{x} \in S_\sigma, \end{aligned}$$

где S_u и S_σ – части границы с заданными перемещениями и нагрузками соответственно, \vec{n} – нормаль к поверхности.

Контактное взаимодействие двух поверхностей без учета трения моделировалось соотношениями, записанными в системе координат, связанной с общей нормалью к первой поверхности в точке контакта:

$$\begin{aligned} x_{01} + u_1(t) &= x_{02} + u_2(t) - \text{при наличии контакта,} \\ x_{01} + u_1(t) &< x_{02} + u_2(t) - \text{при отсутствии контакта,} \end{aligned}$$

где индексы 1 и 2 относятся к соответствующим контактирующим поверхностям, x_{0i} и u_i – начальная координата и перемещение i -ой контактирующей точки соответственно.

Численная реализация была выполнена методом конечных элементов. Предварительно по методике, изложенной в работах [9], были определены поля остаточных напряжений, формирующиеся в волокне в процессе высокотемпературной вытяжки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе многовариантных численных экспериментов были получены поля остаточных напряжений в оптоволокне после высокотемпературной вытяжки, характерные эпюры которых приведены на рис. 4.

На втором этапе были получены зависимости компонент тензора напряжений от времени, в условиях изменения температуры по приведенному на рис. 2 термоциклу. Характерные зависимости эволюции компонент тензора напряжений в центре светопроводящей жилы для двух разных отклонений геометрии волокна для катушек радиусом 50 мм и 10 мм приведены на рис. 5. Видно, что наибольшее влияние изменение температуры оказывает на σ_z . При нагреве катушки радиусом 50 мм до 60 °С, σ_z в центре светопроводящей жилы увеличивается более чем в 1,6 раза, достигая в максимуме 142-145 МПа, а при дальнейшем охлаждении до -60 °С уменьшается до 40 МПа, а изменение σ_x и σ_y не превышает 20%.

На рис. 6 приведены зависимости контактного давления от температуры для двух вариантов радиуса катушки и силы натяжения волокна при намотке на катушку $F_T=0,2$ Н и $F_T=0,02$ Н. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что при отрицательных температурах контактное давление становится равным 0. Это говорит о том, что происходит «разрыв» контакта. Характерные нелинейные участки в районе 6800-8600 секунд соответствуют релаксационным процессам в первичном защитно-упрочняющем покрытии, которое при нагреве начинает размягчаться. Для катушки радиусом 50 мм и усилия натяга $F_T = 0,02$ Н температура соответствующая разрыву контакта равна 19 °С и -2 °С при $F_T = 0,2$ Н, для катушки 10 мм и усилия натяга $F_T = 0,2$ Н 7 °С. Установлено, что чем больше сила натяга и радиус катушки, тем ниже температура, при которой происходит разрыв контакта.

На третьем этапе, используя известные соотношения [12, 13], связывающие компоненты тензора напряжений с оптическими характеристиками

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= -C_1\sigma_x - C_2(\sigma_y + \sigma_z), \\ \Delta n_y &= -C_1\sigma_y - C_2(\sigma_x + \sigma_z), \quad B_i = \Delta n_x - \Delta n_y, \\ B &= \frac{(C_1 - C_2) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (\sigma_x(r, \phi) - \sigma_y(r, \phi)) |E(r, \phi, V)|^2 r dr d\phi}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} |E(r, \phi, V)|^2 r dr d\phi}, \end{aligned}$$

где C_1, C_2 – коэффициенты фотоупругости, E – распределение интенсивности основной моды, B_i – материальное двулучепреломление, B – модовое двулучепреломление, $\Delta n_x, \Delta n_y$ – приращение показателя преломления света, вызванное на-

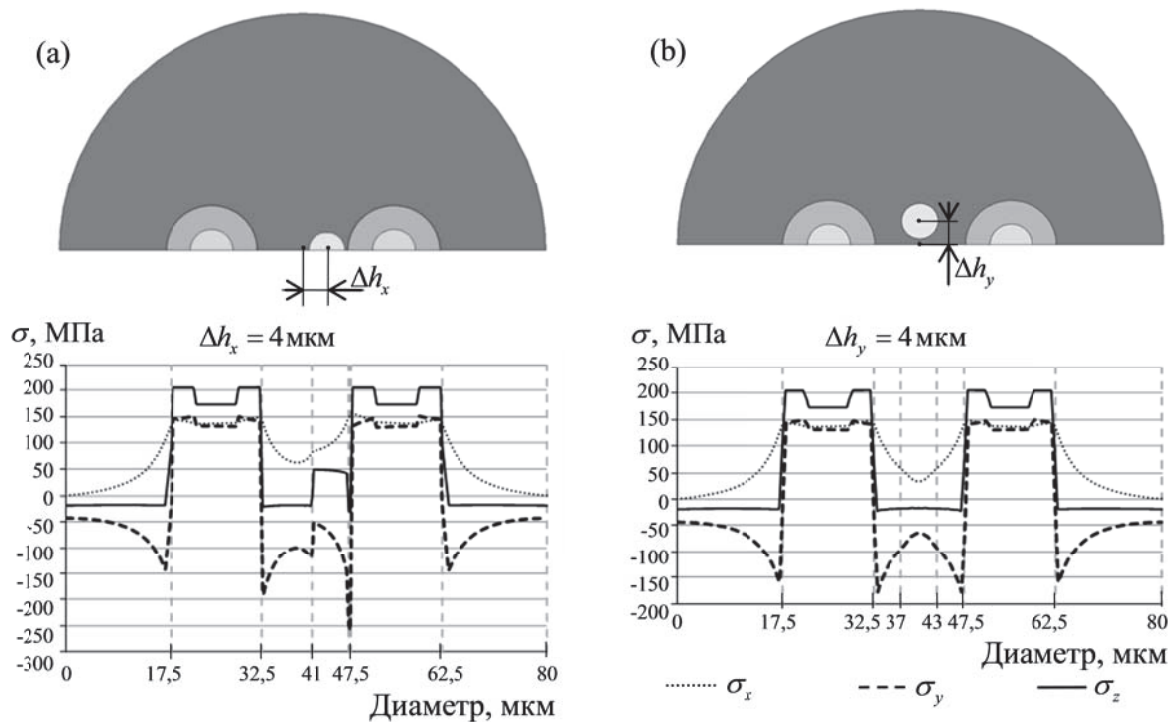


Рис. 4. Эпюры компонент тензора остаточных напряжений после вытяжки, вдоль линии, соединяющей центры силовых стержней: (a) – $\Delta h_x = 4 \text{ мкм}$; (b) – $\Delta h_y = 4 \text{ мкм}$

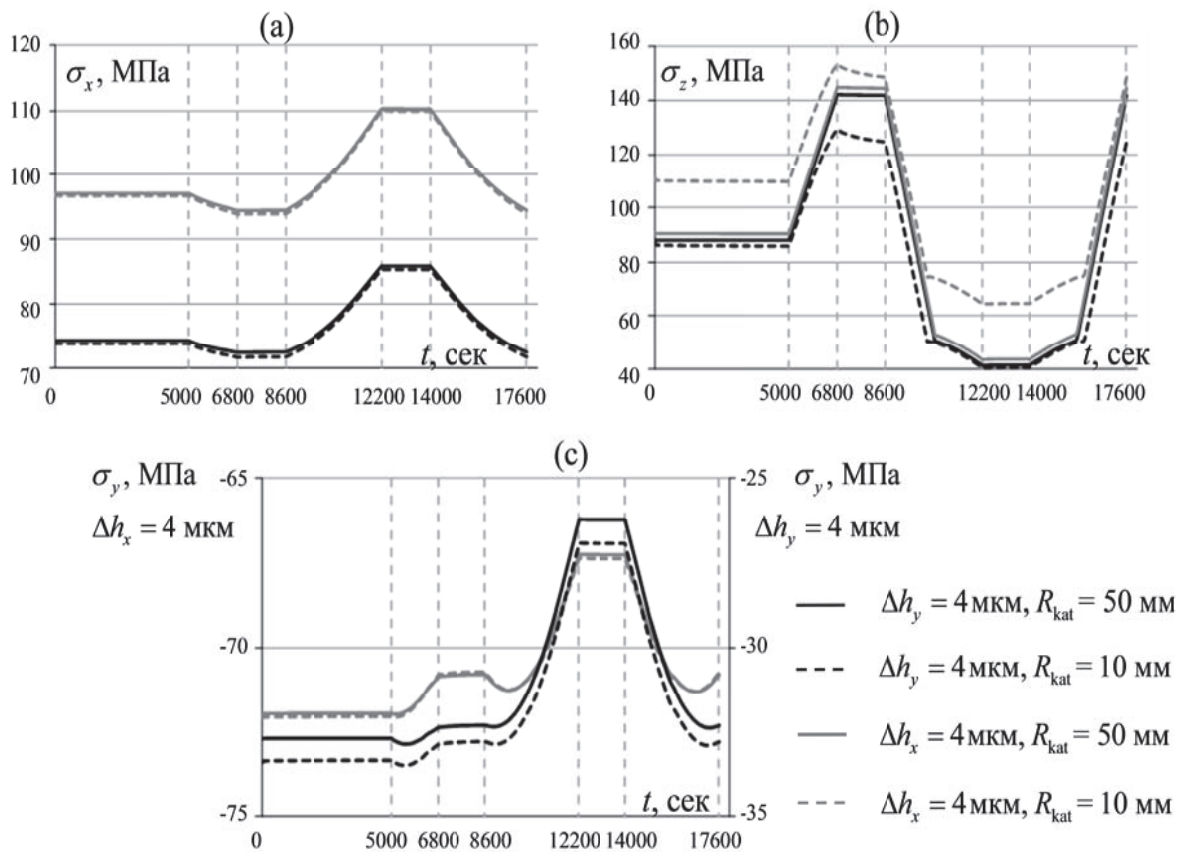


Рис. 5. Эволюция компонент тензора напряжений в центре светопроводящей жилы ($F_T = 0,2 \text{ Н}$): (a) – σ_x , (b) – σ_z , (c) – σ_y

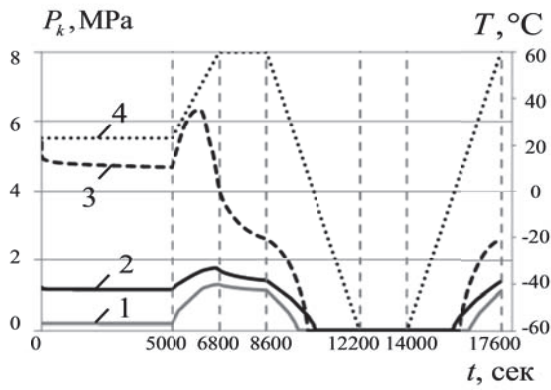


Рис. 6. Эволюция контактного давления:
 1 – $F_T = 0,02 H, R_{kat} = 50$ мм,
 2 – $F_T = 0,2 H, R_{kat} = 50$ мм, 3 – $F_T = 0,2 H, R_{kat} = 10$ мм,
 4 – график с изменением температуры

пряженно-деформированным состоянием, были получены зависимости показателя преломления и модового двулучепреломления от отклонений геометрии волокна и температуры (рис.7, 8). На рис.7 приведена зависимость $\Delta B = B' - B_0$ от Δh_x и Δh_y при разных значениях температуры, где B', B_0 – двулучепреломление волокна с отклонением геометрических параметров и с проектной формой соответственно. В результате анализа полученных данных установлено, что отклонение светопроводящей жилы по оси OY более чувствительно к изменению температуры, о чем свидетельствует больший разброс кривых на рис. 7, который растет с увеличением отклонения Δh_y , из чего также можно сделать вывод, что чем больше отклонение геометрии волокна, тем большее влияние на его оптические характеристики оказывает изменение температуры. Нелинейное изменение отклонений показателя преломления света на участке

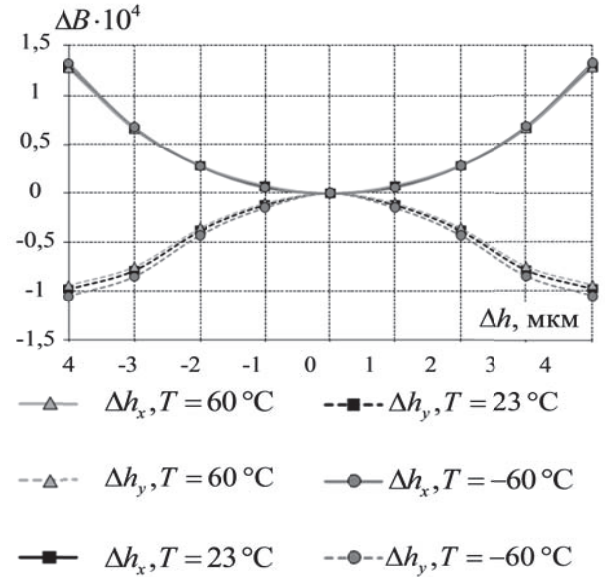


Рис. 7. Зависимость отклонения двулучепреломления от Δh – смещения светопроводящей жилы волокна при $R_{kat} = 50$ мм

выдержки после нагрева с 6800 по 8600 секунды (рис. 8) коррелирует с эволюцией контактного давления (рис. 6) и становится более выраженным при уменьшении радиуса катушки. Этот эффект объясняется тем, что при нагреве податливость внешнего полимерного покрытия, находящегося в состоянии релаксационного перехода, увеличивается более чем на порядок и под действием контактного давления в условиях выдержки при температуре 60 °C, в нем развиваются деформации ползучести, за счет чего происходит частичная разгрузка растянутого кварцевого волокна. При больших радиусах намотки, этот эффект практически незаметен, т.к. контактное давление существенно меньше (рис. 6).

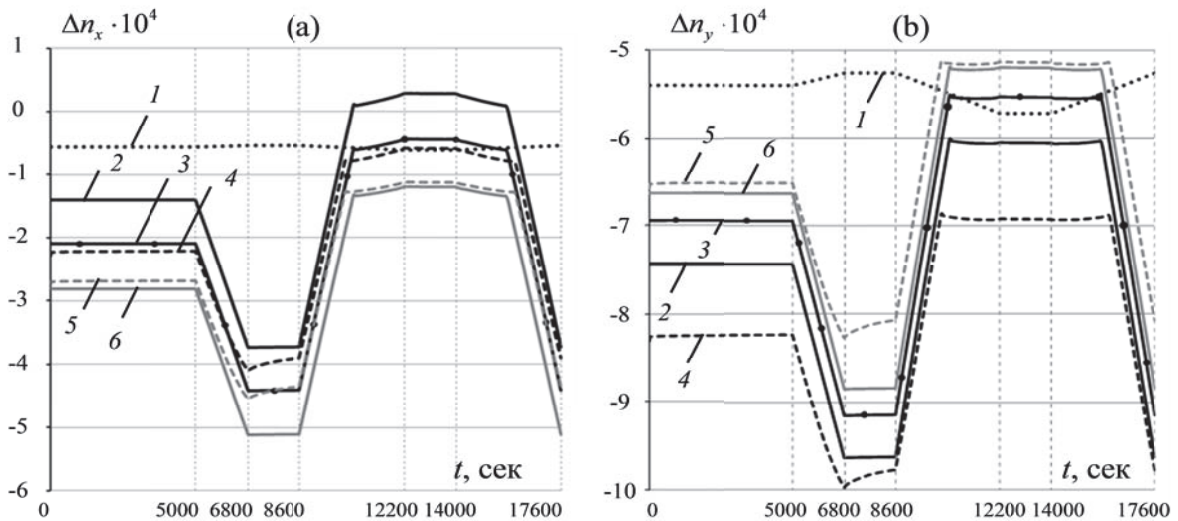


Рис. 8. Эволюция отклонения показателя преломления в условиях термоцикла (а) по оси x, (б) по оси y:
 1 – свободное волокно без отклонений геометрии;
 2 – $\Delta h_x = 4$ мкм, $R_{kat} = 50$ мм; 3 – волокно без отклонений геометрии, $R_{kat} = 50$ мм;
 4 – $\Delta h_x = 4$ мкм, $R_{kat} = 10$ мм; 5 – $\Delta h_y = 4$ мкм, $R_{kat} = 10$ мм; 6 – $\Delta h_y = 4$ мкм, $R_{kat} = 50$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования построена численная модель контактного взаимодействия катушки с анизотропным оптическим волокном в защитно-упрочняющем покрытии при силовой однорядной намотке в условиях термоцикла. В результате проведенных многовариантных численных экспериментов были получены зависимости, описывающие эволюцию полей напряжений в волокне, а также связанные с ними оптические характеристики. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение температуры в рассматриваемом диапазоне оказывает существенное влияние на НДС волокна.

2. При охлаждении происходит отрыв волокна от алюминиевой катушки. Температура, при которой это происходит, зависит от радиуса катушки и усилия натяга, с которым наматывалось волокно.

3. За счет деформаций ползучести во внешнем защитно-упрочняющем покрытии, развивающихся под действием высокой температуры и контактного воздействия, происходит частичная разгрузка кварцевого волокна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors // *Opt. Fiber Technol.* 2003. Vol. 9. P. 57–79.
2. Transverse load sensor based on Mach-Zehnder interferometer constructed by a bowknot type taper/ *W. Lou, F. Shentu, Y. Wang, C. Shen, X. Dong // Opt. Fiber Technol.* 2018. Vol. 40. P. 52–55.
3. Fiber-optic bend sensor using LP21 mode operation/ *Y. Fan, G. Wu, W. Wei, Y. Yuan, F. Lin, X. Wu // Opt. Exp.* 2012. Vol. 20. P. 26127–26134.
4. Семенов Н.В., Труфанов Н.А., Адамов А.А. О технологических несовершенствах геометрических параметров силового стержня для заготовки оптического волокна Panda // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2014. №1(89). С.54–59.
5. Численно-экспериментальное исследование влияния технологических несовершенств геометрии силовых стержней на напряженное состояние и оптические характеристики световода типа «Панда» / *Е.В. Праведникова, Н.В. Семенов, А.Н. Труфанов, Н.А. Труфанов // Известия Самарского научного центра РАН.* 2014. Т. 16. № 6. С. 89–94.
6. Ulrich R., Rashleigh S. Polarization coupling in kinked single-mode fibers // *IEEE J. Quantum Electron.* 1982. Vol. 18. P. 2032–2039.
7. Bløtekjær K. Strain distribution and optical propagation in tension-coiled fibers// *Optics Letters.* 1993. Vol. 18. P. 1059–1061.
8. Lesnikova Y.I., Smetannikov O.Yu. Trufanov A.N., Trufanov N.A. Contact stresses modeling at the Panda-type fiber single-layer winding and evaluation of their impact on the fiber optic properties // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2017. Vol. 177. P. 012116.
9. 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.
10. Лунин Б.С., Торбин С.Н. О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол// *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия.* 2000. Т. 41. №3. С. 172–173.
11. Наймушин И.Г., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Численный анализ деформационных процессов в оптоволоконном датчике// *Вестник ПНИПУ. Механика.* 2012. №1. С. 104–116.
12. Tsai K.-H., Kim K.-S., Morse T.F. General solutions for stress-induced polarization in optical fibers // *Journal of Lightwave Technology.* 1991. Vol. 9. P. 7–17.
13. Park Y., Paek U. C., Kim D. Y. Characterization of a Stress-Applied Polarization-Maintaining (PM) Fiber Through Photoelastic Tomography // *Journal of lightwave technology.* 2003. V. 21. №. 4. P. 997–1004.

STUDY OF OPTICO-MECHANICAL PROPERTIES OF FIBERS UNDER THERMOCYCLING CONDITIONS

© 2018 Y.I. Lesnikova, A.N. Trufanov, O.Yu. Smetannikov

Perm National Research Polytechnic University

The study describes the evolution of the stress strain state in an polarization-maintaining optical fiber of Panda-type in conditions of contact interaction between the fiber and the coil with a single-strand power winding and cyclic temperature change by means of mathematical modeling. The finite element method is used to construct a finite-dimensional discrete analog. Multivariant computational experiments were carried out in which the coil diameter and deviations of the cross-section geometry of the Panda-type fiber were varied. The dependences describing the evolution of the stress strain state in the fiber, the refraction index and birefringence in the light-conducting core were obtained. The influence of the geometry deviations of the cross section of the Panda-type fiber to optical characteristics were investigated. It was shown that the greater deviation of the geometry from the design values, leads the greater temperature change influence on its optical characteristic. It was found that the small diameter coils are characterized by nonlinear changes in the parameters under study at high temperatures, due to relaxation processes in the protective coating of the fiber.

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

Oleg Smetannikov, Doctor of Technics, Associate Professor at the Department of Computational Mathematics and Mechanics. E-mail: sou2009@mail.ru

Trufanov Alexander, Candidate of Technics, Associate Professor at the Department of Computational Mathematics and Mechanics. E-mail: ant@pstu.ru

Yulia Lesnikova, Postgraduate Student of the Department of Computational Mathematics and Mechanics. E-mail: ulesig@gmail.com