

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИИ СИЛОВЫХ СТЕРЖНЕЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОВОДА ТИПА “ПАНДА”

© 2014 Е.В. Праведникова, Н.В.Семенов, А.Н.Труфанов, Н.А.Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 24.11.2014

Проведён статистический анализ экспериментальных данных о геометрических параметрах поперечного сечения партии оптических волокон. Показано, что при изготовлении волокон не удается получить идеальное соответствие фактических параметров проектным значениям. Выявлены наиболее типичные формы сечений и отклонения. Исследование касается таких величин как диаметры волокна, силовых стержней и светопроводящей жилы, а также положение силовых стержней и светопроводящей жилы относительно центра волокна. Установлено, что отклонения значений этих параметров варьируются в пределах 10%. Экспериментально замеренные величины двулучепреломления, важной оптической характеристики волокна, связанной с механическими напряжениями, коррелируют с такими геометрическими параметрами, как диаметры силовых стержней и расстояния от центров стержней до центра волокна. В конечно-элементном пакете ANSYS проведён численный эксперимент по нахождению остаточных напряжений в процессе изготовления кварцевого оптического волокна типа “Панда” с учётом реальной формы геометрии волокна и его конструктивных элементов. Результаты представлены в виде графиков и аналитических зависимостей, которые соответствуют полученным экспериментально и дополняют их. Установлено, что при возможных отклонениях геометрии, величина двулучепреломления световода может изменяться в пределах 30%.

Ключевые слова: анизотропное оптическое волокно, статистическая обработка результатов, остаточные напряжения, двулучепреломление.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптическое волокно считается самой совершенной физической средой для передачи информации, в том числе на значительные расстояния [1-3]. Для изготовления высокоточных датчиков таких как волоконно-оптический гироскоп используется специальный тип волокна, так называемое анизотропное одномодовое волокно [4, 5], например, волокно типа “Панда”. Такое волокно сохраняет состояние поляризации вводимого в него излучения. Эффект достигается за счёт создания в светопроводящей жиле анизотропии распределения полей остаточных напряжений. Это достигается путем введения в заготовку волокна специальных силовых стержней из кварцевого стекла, легированного небольшими добавками примесей, значительно увеличивающих коэффициент линейного температурного расширения

и уменьшающих температуру стеклования [6, 7]. В процессе изготовления волокна после охлаждения от 2000°C до температуры окружающей среды в светопроводящей жиле волокна формируется необходимый уровень разности главных механических остаточных напряжений, который в рамках действия фотоупругих эффектов способствует изменению двулучепреломления.

При проектировании конструкции волокна и выбора параметров технологического процесса его изготовления предполагается, что волокно, его заготовка и конструктивные элементы волокна и заготовки имеют идеальные геометрические формы. У волокна типа “Панда” сечения светопроводящей жилы и силовых стержней должны иметь круглую форму, центры светопроводящей жилы и волокна совпадать, а центры силовых элементов находится на одинаковом расстоянии и на одной прямой, проходящей через центр волокна [8-10]. Однако технологический процесс изготовления волокна связан со сложным поведением материала в широком температурном диапазоне, при котором неоднородно легированный материал из вязкотекучего состояния переходит в стеклообразное. В таких условиях, когда остаточное напряженное состояние определяется совокупностью факторов, связанных со свойствами материалов и условиями технологического процесса изготовления, имеющиеся не-

Праведникова Екатерина Владимировна, магистрант.

E-mail: pravkat@gmail.com.

Семенов Никита Владимирович, аспирант кафедры вычислительной математики и механики.

E-mail: nikita@studio-gd.ru

Труфанов Александр Николаевич, кандидат технических наук, директор регионального центра информатизации.

E-mail: ant@pstu.ru.

Труфанов Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и механики. E-mail: vmm@pstu.ru

совершенства геометрии могут влиять на механические и оптические характеристики волокна. В данной работе исследуется влияние отклонений некоторых геометрических параметров силовых стержней в составе готового волокна от их проектных значений.

ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛОКНА

Геометрические параметры поперечного сечения каждого оптического волокна типа “Панда” фиксировались с помощью измерительной системы РК-2400, всего исследовано 1400 образцов. На рис. 1 представлена схема части кругового сечения волокна с указанием характерных измеряемых геометрических параметров.

Предполагается, что волокно с границей Γ , стержни и светопроводящая жила имеют идеальное круговое сечение, а разбросы возможны в величинах диаметров стержней, жилы и в расположении их центров по отношению к проектным позициям. Точки O, S_1, S_2, C – центры волокна, первого, второго силовых стержней и светопроводящей жилы соответственно; D – диаметр волокна; D_1, D_2, D_c – диаметры первого и второго силовых стержней, а также светопроводящей жилы соответственно; L_1, L_2, L_c – расстояния от центра волокна до центров силовых стержней и жилы; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_c$ – углы между отрезками, соединяющими центры силовых стержней, светопроводящей жилы с центром волокна и основной осью (здесь и далее под основной осью понимаем прямую, параллельную отрезку, соединяющему центры силовых стержней, проходящую через центр волокна).

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе измеренных данных получены статистические зависимости, характеризующие реальное распределение геометрических пара-

метров волокна “Панда” и его конструктивных элементов. Полученные значения представлены на графиках в условных безразмерных единицах вычисленных по формуле: $Y' = Y/Y_{cp}$, где Y – анализируемое значение, Y_{cp} – среднее арифметическое значений соответствующей геометрической характеристики. При анализе параметров геометрических характеристик силовых стержней порядок стержней (первый или второй стержень) не определяется, поэтому D_i – объединённый набор величин D_1, D_2 , L_i – объединённый набор величин L_1, L_2 , а φ_i – объединённый набор величин φ_1, φ_2 .

В математическом пакете STATISTICA подобраны законы распределения геометрических параметров, рис. 2-7. Из результатов подбора распределения для определенной выборки присваивается тот закон распределения из исследованных, который при найденных значениях его параметров дает минимальные значения статистики Колмогорова-Смирнова и статистики хи-квадрат.

Распределения диаметров волокна, силовых стержней и светопроводящей жилы стремятся к нормальному закону. При этом диаметры волокна D варьируется в небольших диапазонах ($<1\%$), (рис.2), а диаметры силовых стержней D_i (рис.3) и диаметры светопроводящей жилы D_c (рис.4.) варьируются в пределах 10%.

Расстояние от центров силовых стержней до центров волокна L_i изменяется в пределах 10% по нормальному закону распределения (рис. 5).

Расстояние от центра светопроводящей жилы до центра волокна L_c подчиняется логнормальному закону (рис. 6).

На основе обработки экспериментально измеренных значений двулучепреломления световода B , установлено, что данная характеристика коррелирует с такими величинами как диаметры силовых стержней D_i и расстояния от центров стержней до центра волокна L_i в соответствии с формулой вычисления нормированного коэффициента корреляции:

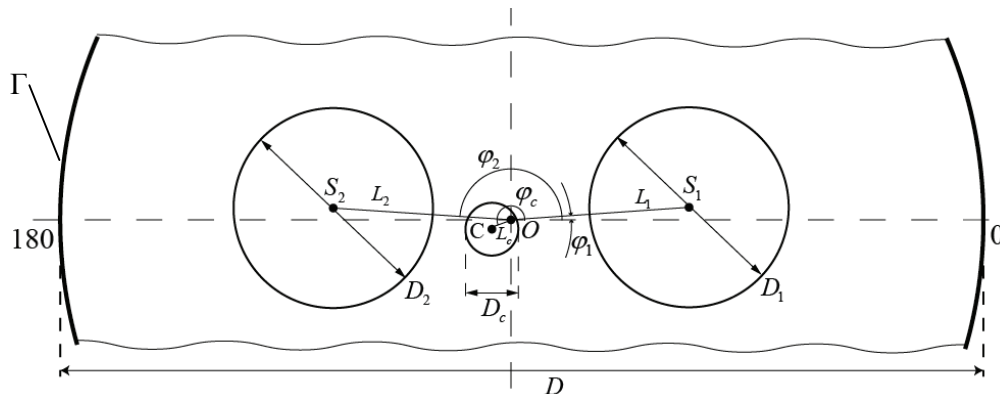


Рис. 1. Схема области поперечного сечения оптического волокна типа “Панда”, содержащей конструктивные элементы

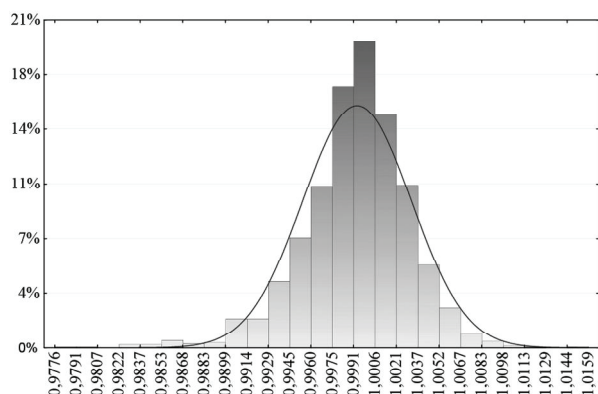


Рис. 2. Гистограмма распределения диаметра волокна D'

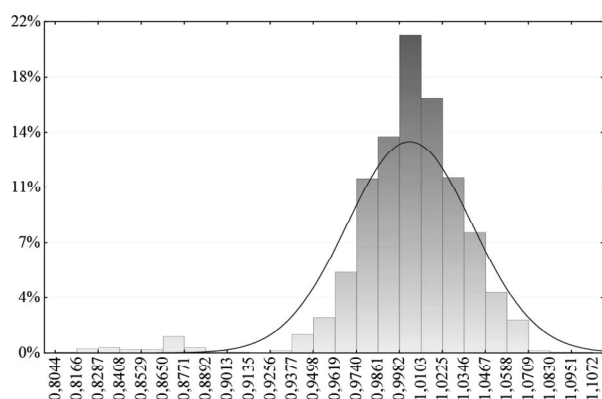


Рис. 4. Гистограмма распределения диаметра светопроводящей жилы D_c'

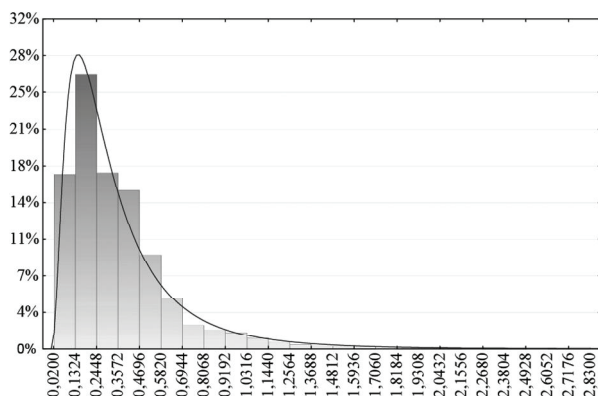


Рис. 6. Гистограмма распределения расстояний от центра светопроводящей жилы до центра волокна L_c

$$r_{nm} = \frac{M(R_n - M(R_n))M(R_m - M(R_m))}{\sigma_n \sigma_m},$$

где R_n, R_m – распределение величин, M – математическое ожидание, σ_n, σ_m – средние квадратичные отклонения для R_n и R_m соответственно.

Двулучепреломление B прямо пропорционально диаметрам силовых стержней ($r_{BD_i} = 0,56$) и обратно пропорционально расстоянию от

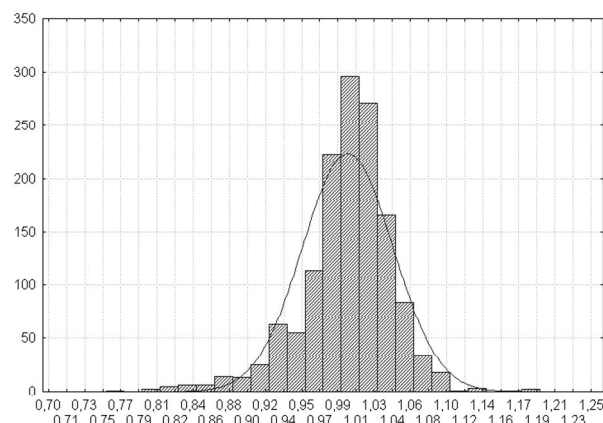


Рис. 3. Гистограмма распределения диаметров силовых стержней D_i'

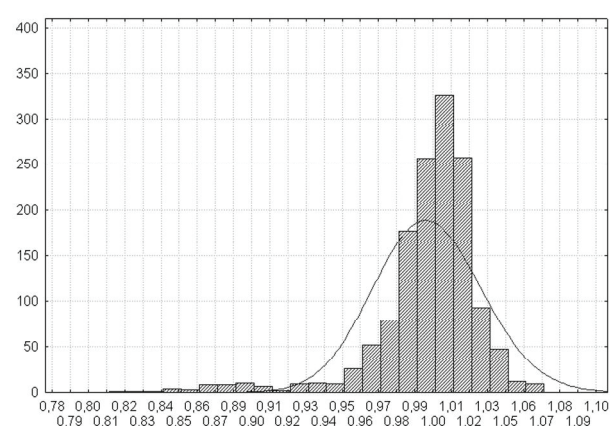


Рис. 5. Гистограмма распределения расстояний от центров силовых стержней до центров волокна L_i'

центров силовых стержней до центра волокна ($r_{BL_i} = -0,22$). По результатам статистического и корреляционного анализа геометрических параметров выделены диапазоны изменения значений величин влияющих на величину двулучепреломления.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрим задачу о нахождении остаточных напряжений, возникающих в результате охлаждения волокна до температуры окружающей среды после вытяжки из заготовки под действием высокой температуры ($\sim 2100^\circ\text{C}$). Процесс связан с переходом материала из вязкоупругого состояния в стеклообразное. В статье [8] показано, что при решении задачи теплопроводности об охлаждении волокна в процессе вытяжки температура на поверхности и в центре волокна отличаются несущественно. Поэтому решение квазистатической краевой задачи (считаем, что процесс зависит от времени, но при этом скорости настолько малы, что силами инерции можно пре-

небредь) об изменении полей напряжений ведём с учётом предположения об однородности температуры в поперечном сечении волокна и зависимости от времени, установленной в [8]. Тогда задача о нахождении напряжённо-деформированного состояния волокна соответствует случаю обобщенной плоской деформации и включает уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}(x, y, t)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y(x, y, t)}{\partial y} = 0,$$

$$x, y \in S,$$

геометрические соотношения:

$$\varepsilon_x(x, y, t) = \frac{\partial u_x(x, y, t)}{\partial x}, \quad \varepsilon_y(x, y, t) = \frac{\partial u_y(x, y, t)}{\partial y},$$

$$\gamma_{xy}(x, y, t) = \frac{\partial u_x(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial u_y(x, y, t)}{\partial x},$$

$$x, y \in S.$$

граничные условия:

$$\sigma_x(x, y, t)n_x + \tau_{xy}(x, y, t)n_y = 0,$$

$$\tau_{xy}(x, y, t)n_x + \sigma_y(x, y, t)n_y = 0,$$

$$x, y \in \Gamma,$$

физические соотношения:

$$\sigma_x(x, y, t) = (B + \frac{4}{3}G)(\varepsilon_x(x, y, t) - \varepsilon_{ax}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t)) + (B - \frac{2}{3}G)(\varepsilon_y(x, y, t) - \varepsilon_{ay}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t))$$

$$\sigma_y(x, y, t) = (B - \frac{2}{3}G)(\varepsilon_x(x, y, t) - \varepsilon_{ax}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t)) + (B + \frac{4}{3}G)(\varepsilon_y(x, y, t) - \varepsilon_{ay}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t)),$$

$$\frac{\varepsilon_{ax}}{t}(x, y, t) = \frac{1}{\eta}(\sigma_x - \sigma),$$

$$\frac{\varepsilon_{ay}}{t}(x, y, t) = \frac{1}{\eta}(\sigma_y - \sigma), \quad x, y \in S,$$

где t – время, n – внешняя нормаль к Γ ,

$$\varepsilon_T(x, y, t) = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT - \text{температурная деформация,}$$

$\varepsilon_{ax}(x, y, t)$, $\varepsilon_{ay}(x, y, t)$ – компоненты тензора вязких деформаций $\hat{\varepsilon}_e$. $\sigma = \sigma_{kk}/3$ – среднее напряжение, $\hat{E}$ – единичный тензор второго ранга. Девиатор тензора вязкой деформации

$$\hat{e}_e(x, y, t) = \hat{\varepsilon}_e(x, y, t) - \frac{1}{3}\theta_e(x, y, t)\hat{E}, \quad \text{в силу}$$

того, что в расплавленном состоянии материал предполагается несжимаемой жидкостью ($\theta_B = 0$), равен тензору вязких деформаций $\hat{e}_B = \hat{\varepsilon}_B$; $\theta_B = \varepsilon_{Bkk}$ – объемная деформация. B – модуль объемного сжатия; G – модуль сдвига

Вследствие неоднородного легирования силовых стержней коэффициент линейного температурного расширения α и вязкость η являются функциями концентраций легирующих элементов и координат.

$$\alpha = \alpha(\mu(x, y)), \quad \eta = \eta_0(\mu(x, y))e^{\frac{U(\mu(x, y))}{RT(x, y, t)}},$$

где $U(\mu(x, y))$ – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, $\mu(x, y)$ – концентрация легирующих элементов. Известно [6], что влияние небольших степеней легирования кварцевого стекла на упругие характеристики незначительно.

В конечно-элементном пакете ANSYS проводится численный эксперимент по нахождению остаточных напряжений в процессе изготовления кварцевого оптического волокна типа “Панда”, позволяющий задавать реальную форму геометрии волокна и его конструктивных элементов.

В результате вычислительных экспериментов выявлено, что при отклонении формы сечения волокна от проектной величины количественно напряжения изменяются незначительно. Так, например, на рис.7. приведены распределения интенсивностей напряжений при разных отклонениях формы геометрии и разница между максимальными значениями составляет не больше 3%. Меняется качественное распределение напряжений по сечению, в том числе и в области светопроводящей жилы, что влечёт за собой возможность изменения величины двулучепреломления B , которое в данном случае вычисляется по формуле:

$$B = C(\lambda) \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} (\sigma_x(r, \varphi) - \sigma_y(r, \varphi)) |E(r, \varphi, V)|^2 r dr d\varphi \times \\ \times \left(\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} |E(r, \varphi, V)|^2 r dr d\varphi \right)^{-1}$$

где r, φ – соответствующие оси цилиндрической системы координат, σ_x и σ_y – нормальные напряжения в поперечном сечении волокна, $C(\lambda)$ – фотоупругая постоянная для данной длины волны, $|E(r, \varphi, V)|^2$ – распределение интенсивности основной моды по поперечному сечению све-

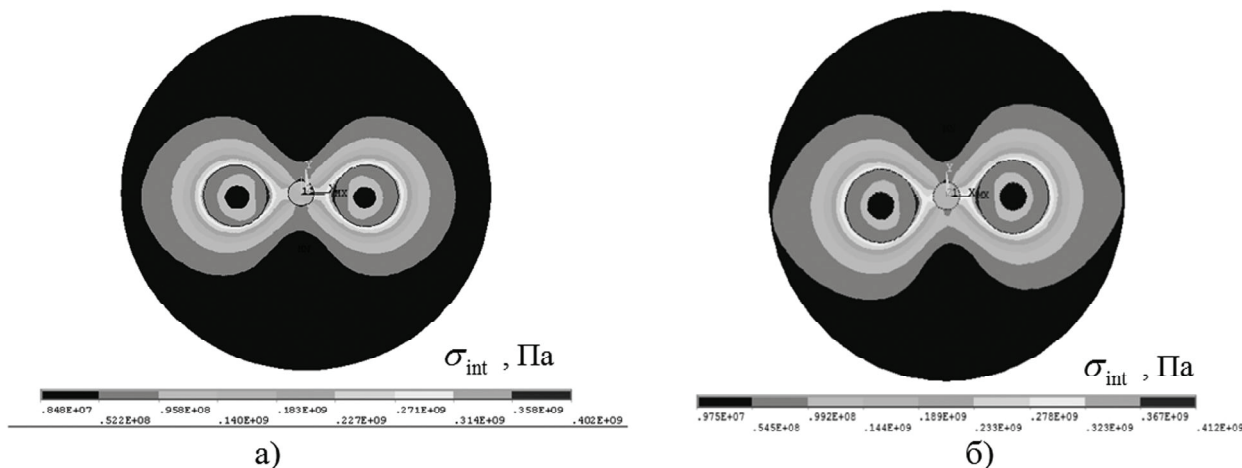
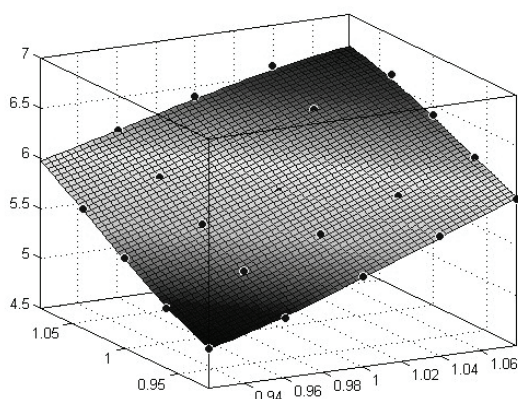


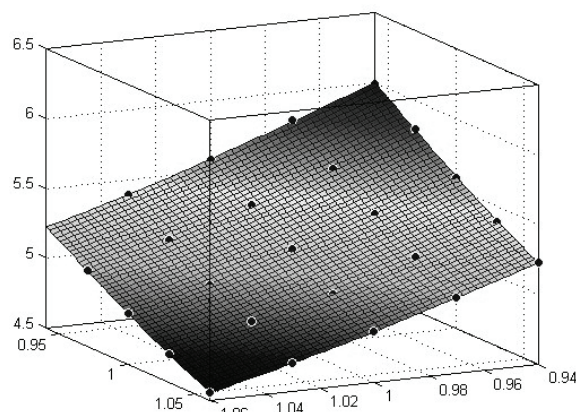
Рис. 7. Интенсивность напряжений σ_{int} в волокне:
а – проектная форма; б – форма с отклонениями

$B \cdot 10^{-4}$



а)

$B \cdot 10^{-4}$



б)

Рис. 8. Зависимость модового двулучепреломления световода B от значений
а – диаметров силовых стержней D_1' и D_2' ;
б – расстояний от центров силовых стержней до центра волокна L_1 и L_2

товода. В данном исследовании принималось равномерное распределение $E(r, \varphi, V) = E_0$.

Выполнены численные исследования напряженного состояния оптического волокна Panda и определены величины модового двулучепреломления при установленных наиболее вероятных разбросах диаметров силовых стержней D_1 , D_2 и расстояний от центров стержней до центров волокна L_1 и L_2 (рис.8).

Методом наименьших квадратов получены удобные в инженерных целях аппроксимирующие выражения поверхностей полными кубическими полиномами.

$$B(D_1', D_2') = b_{00} + b_{10}D_1' + b_{01}D_2' + b_{20}D_1'^2 + b_{11}D_1'D_2' + b_{02}D_2'^2 + b_{30}D_1'^3 + b_{21}D_1'^2D_2' + b_{12}D_1'D_2'^2 + b_{03}D_2'^3$$

$$b_{00} = 0,03249; b_{10} = -3022; b_{01} = -3022; b_{20} = 1,178E+08; b_{11} = 1,405E+08; b_{02} = 1,178E+08; b_{30} = -1,639E+12; b_{21} = -2,211E+12; b_{12} = -2,211E+12; b_{03} = -1,639E+12$$

$$B(L_1', L_2') = b_{00} + b_{10}L_1' + b_{01}L_2' + b_{20}L_1'^2 + b_{11}L_1'L_2' + b_{02}L_2'^2 + b_{30}L_1'^3 + b_{21}L_1'^2L_2' + b_{12}L_1'L_2'^2 + b_{03}L_2'^3$$

$$b_{00} = 0,03924; b_{10} = 607,7; b_{01} = 607,7; b_{20} = 5,263E+07; b_{11} = 7,931E+06; b_{02} = -5,263E+07; b_{30} = 1,28E+12; b_{21} = -7,839E+10; b_{12} = -7,839E+10; b_{03} = -1,28E+12$$

Установленный численно нелинейный характер зависимости отражает установленную ранее экспериментально корреляционную зависимость, состоящую в том, что увеличение диаметра силовых стержней при фиксированном положении их центра приводит к увеличению величины двулучепреломления, а увеличение расстояний от центров силовых стержней до центра волокна L_1 и L_2 приводит к уменьшению величины двулучепреломления. При этом разброс величины двулучепреломления при разных реализациях геометрии достигает 30%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, путем статистической обработки результатов экспериментальных измерений отклонений некоторых геометрических параметров силовых стержней в составе готового волокна от их проектных значений, а также численного исследования влияний этих отклонений на остаточные напряжения в анизотропных оптических волокнах типа “Панда”, установлено существенное изменение двулучепреломления (разброс до 30%) - важной оптической характеристики волокна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранта РФФИ проект № 13-08-96036 р_урал_а и 14-08-31530 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение. М.: Энергоатомиздат, 1991. 264 с.
2. Волоконно-оптические датчики [пер. с яп.] / Т. Око-си, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Каюма, К. Хататэ. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. 256 с.
3. Волоконная оптика и приборостроение / М.М. Бутусов, С.Л. Галкин., С.П. Орбинский, Б.П. Пал. Л.: Машиностроение, 1987. 328 с.
4. Varnham M., Payne D., Barlow A. Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers // Journal of lightwave technology. 1983. V. LT-1, №2. P.332-338
5. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers / R. Guan, F. Zhu, Z. Gan, D. Huang, S. Liu // Optical Fiber Technology. 2005. V. 11. № 3. P. 240-254.
6. Лео В.К., Мазурин О.В. Свойства кварцевого стекла. Л.: Наука, 1985 г. – 166 с.
7. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: Учеб. пособие. М.: ГОУ ВПО МГУИ, 2007. 222 с.
8. Остаточные напряжения в заготовках силовых стержней оптического волокна / Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов, И.И. Крюков // Вестник ПГТУ. Технологическая механика. 2002. С.110-115.
9. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers / A.N. Trufanov, O.Yu. Smetannikov, N.A. Trufanov // Optical Fiber Technology. 2010. V. 16. N 3. P. 156–161.
10. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А. Технологические и остаточные напряжения в неоднородном стеклуемом цилиндрическом стержне // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. № 2. С. 126–140.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF INFLUENCE TECHNOLOGICAL IMPERFECTIONS OF GEOMETRIC PARAMETERS OF STRESS APPLYING PARTS ON THE STRESS STATE AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF PANDA FIBER

© 2014 E.V. Pravednikova, N.V. Semenov, A.N. Trufanov, N.A. Trufanov

Perm National Research Polytechnic University

The experimental data of the geometry of cross sections of the party of Panda fiber were statistically analyzed. The analysis shown, that in the fiber manufacture it is not obtained to achieved a complete capability of geometry with the project design. Found the most typical forms of cross sections and deviations. The study concerned with such criteria as diameter of fiber, location of stress applying parts and fiber core relative to the center of fiber. It was found that deviation of these parameters ranges within 10%. Shown that the experimentally measured birefringence correlates to such geometrical parameters as stress rod diameter and distance between centers of rod and fiber. Was conducted a numerical experiment by finite element modeling with Ansys and were found residual stresses during the manufacturing of Panda fiber with account of the real form of fiber geometry and its constructive elements. The results are presented in graphs and analytical relationships that are consistent with the experimental data and complement them. It was found that with possible geometry deviations, the range of birefringence may vary within 30%.

Key words: anisotropic optical fiber, statistical analysis of the results, residual stress, birefringence.

Ekaterina Pravednikova, Undergraduate at the Computational Mathematics and Mechanics Department.

E-mail: pravkat@gmail.com

Nikita Semenov, Postgraduate at the Computational Mathematics and Mechanics Department.

E-mail: nikita@studio-gd.ru

Aleksandr Trufanov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Computational Mathematics and Mechanics Department, Director of the Regional Center of Informatization.

E-mail: ant@pstu.ru

Nikolay Trufanov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Computational Mathematics and Mechanics Department.

E-mail: vmm@pstu.ru