

УДК 681.7.068:539.376

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

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНОСЛОЙНОЙ СИЛОВОЙ НАМОТКЕ АНИЗОТРОПНОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA НА ЕГО ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На основе построенной математической модели и ее численной реализации выполнено исследование влияния контактного взаимодействия волокна типа Panda с оправкой в условиях силовой намотки на цилиндрическую оправку (технологической пробы). Установлено, что основным фактором, влияющим на модовое двулучепреломление, является усилие натяжения при намотке. Анализ результатов численных экспериментов показал, что варьирование диаметра катушки, ориентация волокна относительно нее и наличие одиночного локального микроизгиба незначительно сказываются на оптических характеристиках волокна.

Ключевые слова: анизотропное волокно, сохраняющее поляризацию волокно, контактные напряжения, двулучепреломление, метод конечных элементов, остаточные напряжения.

Iu.I. Lesnikova, O.Iu. Smetannikov, A.N. Trufanov, N.A. Trufanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INFLUENCE OF CONTACT STRESSES UNDER SINGLE-LAYER WINDING ON THE OPTIC PROPERTIES OF PANDA-TYPE FIBER

On the basis of the constructed mathematical model and its numerical implementation, the effect of contact interaction of Panda fiber with a mandrel in a process of technological probe was studied. It was found that the main factor influencing the modal birefringence is winding force. Analysis of the results of numerical experiments showed that the variation of the diameter of the coil, the fiber orientation with respect thereto and the availability of microbending insignificantly affect on the optical characteristics of the fiber.

Keywords: Panda fiber, polarization-maintaining fiber, contact stresses, birefringence, finite elements method, residual stresses.

Введение

В современном приборостроении широкое распространение получили оптические волокна, сохраняющие состояние поляризации. Они используются в качестве чувствительных элементов в интерферометрических датчиках, оптоволоконных гироскопах, системах монито-

ринга и в распределенных датчиках термомеханических воздействий [1–3]. Сохранение поляризации введенного в такие анизотропные волокна светового сигнала обеспечивается полями остаточных напряжений, которые формируются в процессе изготовления за счет заложенных в конструкцию неоднородности термомеханических свойств [4]. На оптические характеристики такого световода оказывают существенное влияние уровень и характер внешних воздействий, взаимное влияние волокон друг на друга, наличие локальных дефектов, приводящих к микроизгибам, поперечное давление от оправки и катушки при силовой намотке в условиях технологической пробы или при изготовлении чувствительного контура. Таким образом, напряженно-деформированное состояние (НДС) в светопроводящей жиле анизотропного волокна и связанные с ним оптические характеристики определяются свойствами материалов кварцевого волокна и полимерных защитно-упрочняющих покрытий (ЗУП), условиями технологических процессов изготовления и внешними воздействиями, имеющими контактную природу [5]. Авторы работ [6, 7] исследовали влияние силовой намотки на оптические характеристики волокна без учета ЗУП и контактного взаимодействия с оправкой. Цель данной работы заключалась в определении закономерностей формирования технологических напряжений в анизотропном волокне типа Panda и оценке их влияния на оптические характеристики с учетом перечисленных выше факторов.

Для построения математической модели взаимодействия анизотропного кварцевого волокна в двухслойном линейно-вязкоупругом полимерном защитно-упрочняющем покрытии с упругой цилиндрической оправкой в условиях однослойной силовой намотки была выполнена постановка краевых задач контактного взаимодействия. Предварительно по методике, изложенной в работах [4, 8], были определены поля остаточных напряжений, формирующиеся в волокне в процессе высокотемпературной вытяжки. Контактные граничные условия формулировались без учета трения. Численное моделирование выполнялось методом конечных элементов. На основе серии вычислительных экспериментов были исследованы закономерности эволюции контактного напряженно-деформированного состояния в световоде для различных вариантов диаметров оправки, ориентации относительно нее волокна, силы натяжения при намотке и уровня остаточных напряжений.

1. Результаты численного моделирования

Конечно-элементный трехмерный аналог исследуемой конструкции представлен на рис. 1, для его построения были использованы трехмерные восьмиузловые элементы. На торцевых сечениях волокна и соответствующих сечениях оправки задано отсутствие перемещений по нормали к плоскостям сечений. В направлении оси симметрии оправки заданы условия обобщенного плоскодеформированного состояния. Расчет проводился для двух ориентаций сечения волокна по отношению к радиальному направлению катушки – параллельного ($\alpha = 0^\circ$) и перпендикулярного ($\alpha = 90^\circ$), а также для двух диаметров катушки – 44 и 100 мм. Сила натяжения F_n волокна в численных экспериментах варьировалась в диапазоне [0; 1] Н.

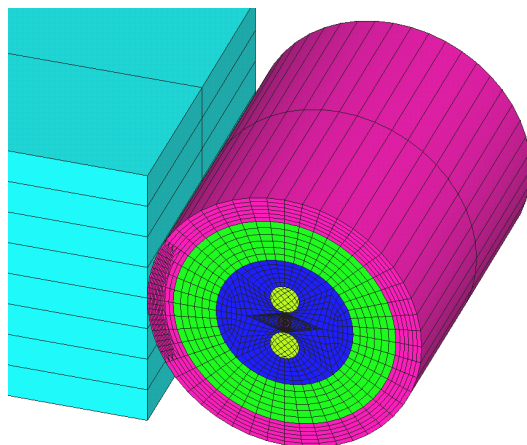
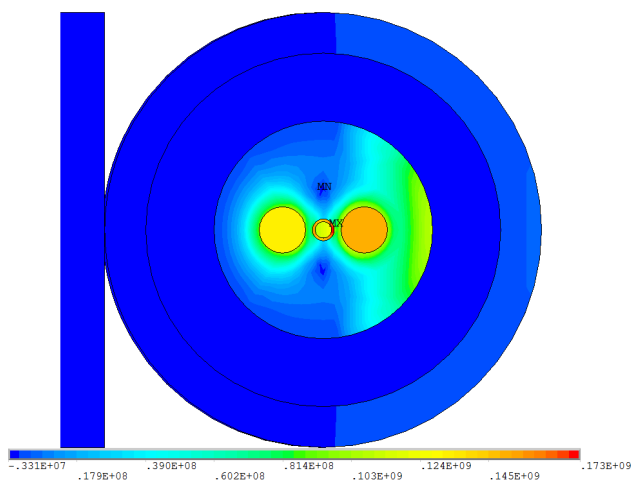
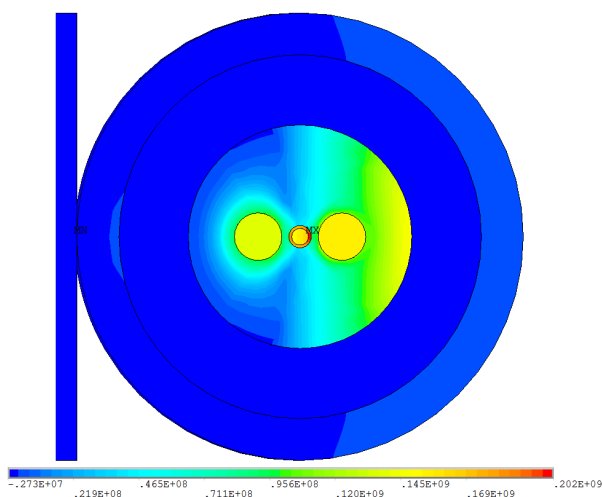


Рис. 1. Конечно-элементная модель контактного взаимодействия волокна и катушки в условиях силовой намотки ($\alpha = 90^\circ$, $D_k = 44$ мм)

На рис. 2, 3 показаны поля первых главных напряжений для двух значений силы натяжения $F_n = 0$ Н и $F_n = 0,2$ Н и двух значений $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$. При таком увеличении усилия намотки максимальное значение первого главного напряжения возрастает на 17 %. Уровень напряжений в ЗУП существенно ниже, чем в кварцевом волокне, что объясняется меньшим на несколько порядков модулем Юнга материала внутренней оболочки защитного покрытия. На приведенных рисунках хорошо видно влияние изгиба на напряженное состояние волокна.

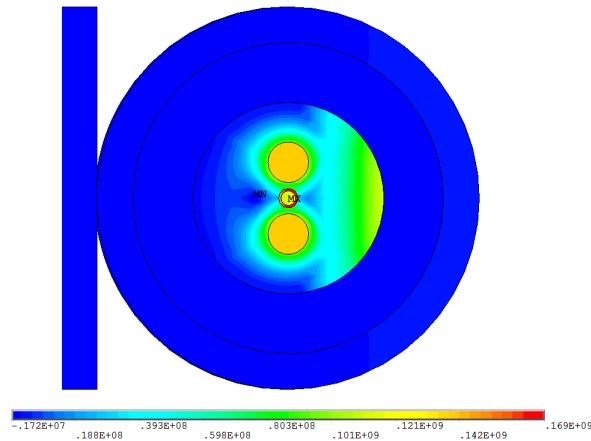


a

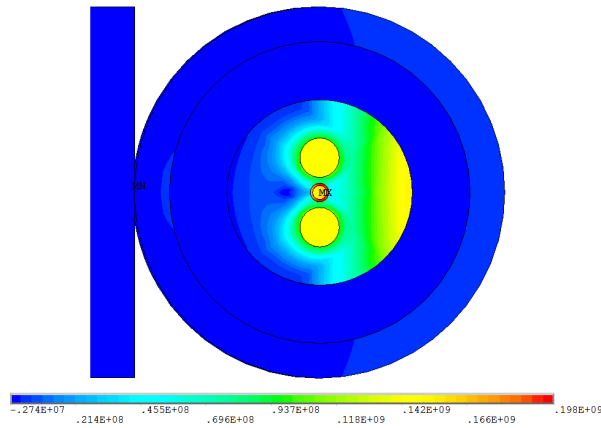


б

Рис. 2. Первое поле первого главного напряжения, Па:
а – $F_n = 0$, $\alpha = 0^\circ$; б – $F_n = 0,2$, $\alpha = 0^\circ$



a



б

Рис. 3. Второе поле первого главного напряжения, Па:
a – $F_n = 0$, $\alpha = 90^\circ$; *б* – $F_n = 0,2$, $\alpha = 90^\circ$

На рис. 4 представлена характерная картина распределения контактного давления, величина которого пропорциональна нагрузке.

В результате действия поперечных контактных усилий в светопроводящей жиле происходит изменение характера распределения полей разности главных напряжений (рис. 5), что в итоге приводит к изменению величины модового двулучепреломления. С увеличением усилия намотки возрастают значения разности главных напряжений,

характер распределения при этом практически не меняется. Влияние вязкоупругих свойств материалов защитно-упрочняющего покрытия проявляется в некоторой релаксации напряжений и, как следствие, приводит к изменению двулучепреломления во времени (рис. б), однако видно, что это влияние незначительно, значение двулучепреломления достаточно быстро (в течение нескольких минут после намотки) стабилизируется.

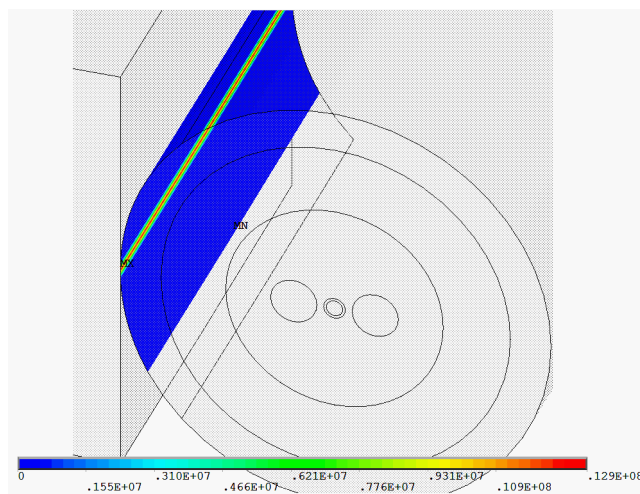


Рис. 4. Распределение контактного давления, Па ($F_n = 1 \text{ Н}$, $\alpha = 0^\circ$)

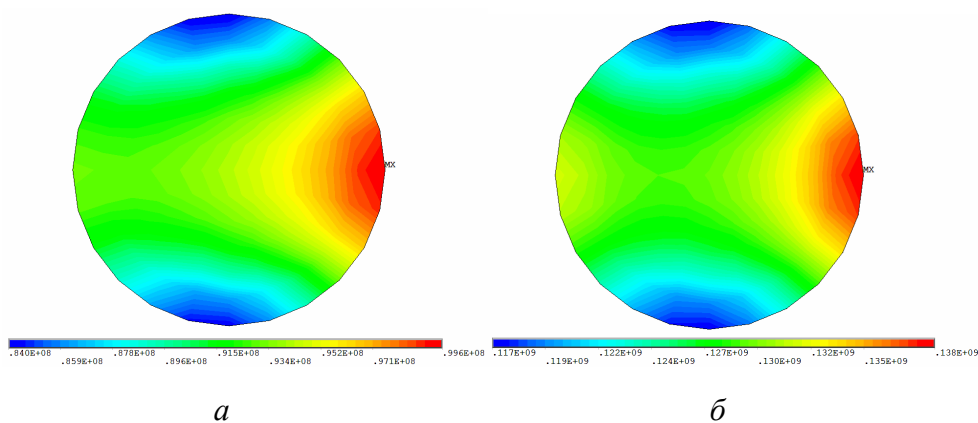


Рис. 5. Разность первого и третьего главных напряжений в светопроводящей жиле, Н:
 $a - F_n = 0 \text{ Н}$; $б - F_n = 1 \text{ Н}$

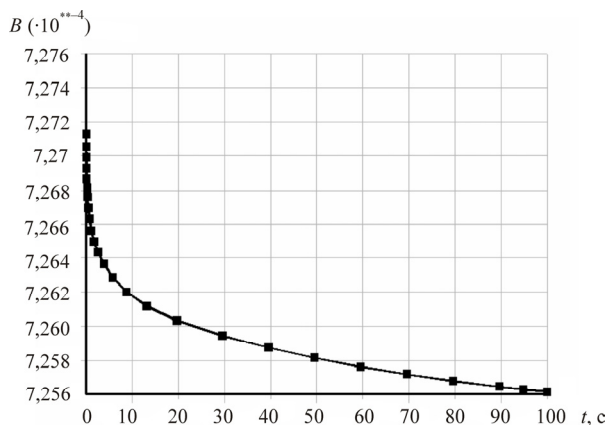


Рис. 6. Эволюция модового двулучепреломления B , $F_n = 1$ Н

На рис. 7 представлены обобщенные данные о зависимости модового двулучепреломления B световода от силы натяжения для двух диаметров катушки и двух ориентаций. Из анализа графиков следует, что основным фактором, влияющим на величину B , является сила натяжения волокна при намотке, формирующая контактные напряжения по границе взаимодействия волокна и поверхности катушки. Как и в работе [6], полученная зависимость $B(F_n)$ линейна, кроме того, двулучепреломление практически не зависит от диаметра катушки и ориентации сечения волокна. Для максимальной исследованной силы $F_n = 1$ Н наблюдается увеличение двулучепреломления на 38 %. Влияние остальных факторов (ориентации и диаметра катушки) колеблется в пределах 0,8 % от средних значений.

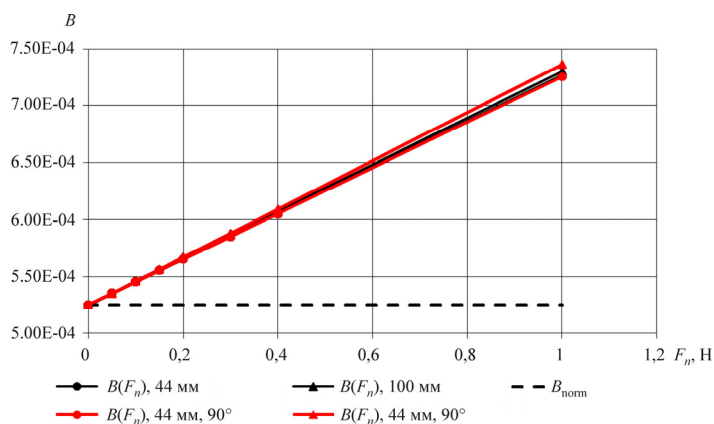


Рис. 7. Зависимость двулучепреломления от силы натяжения волокна, Н

2. Учет микроизгиба волокна

С целью исследования влияния микроизгиба на оптико-механические характеристики волокна была решена задача о напряженно-деформированном состоянии системы «оправка – волокно» при наличии поперечного микроизгиба через продольно приклеенное к оправке волокно диаметром 167 мкм. Такой локальный дефект приводит к дополнительным контактным поперечным усилиям, влияющим на НДС в светопроводящей жиле и, как следствие, на оптические характеристики.

Конечно-элементный трехмерный аналог волокна в районе микроизгиба через поперечный дефект оправки представлен на рис. 8.

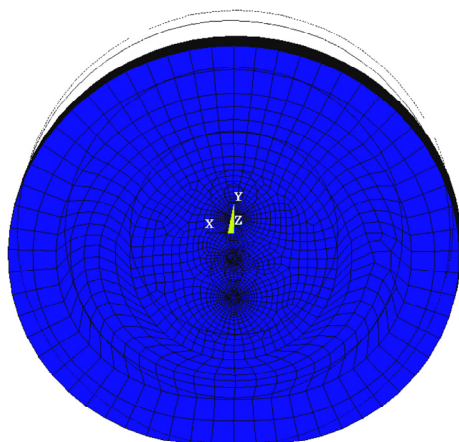


Рис. 8. Деформированная конечно-элементная модель волокна в районе микроизгиба

Картины изолиний нормальных напряжений и интенсивности тензора напряжений в поперечном сечении волокна с ЗУП непосредственно над дефектом представлены на рис. 9. Здесь видно влияние внешних силовых воздействий на характер распределения напряжений: поля имеют слабую несимметричность в вертикальном направлении, что вызвано действием поперечных контактных сил и изгибом. Светопроводящей жилы данное воздействие практически не достигает, поскольку существенное перераспределение локализованных контактных сил обеспечивается внутренней защитной оболочкой из высокоэластичного низко модульного несжимаемого материала.

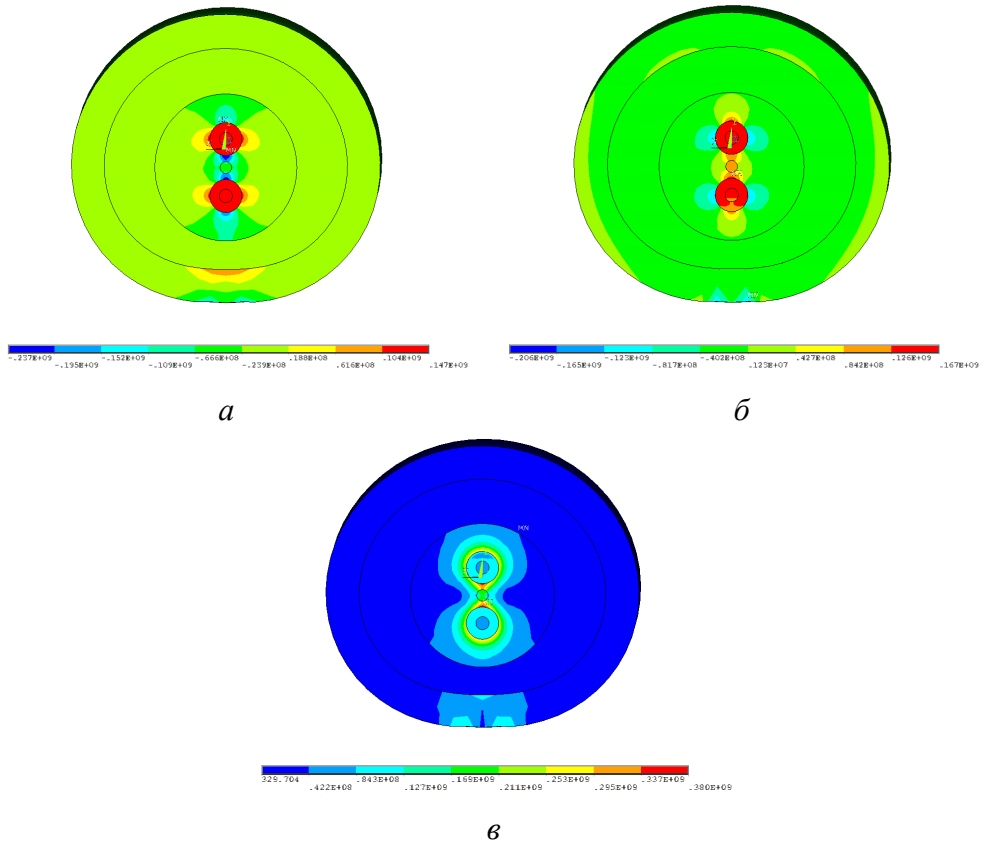


Рис. 9. Нормальные напряжения и интенсивность тензора напряжений в плоскости поперечного сечения волокна с ЗУП, МПа: *a* – σ_x ; *b* – σ_y ; *v* – σ_i

На рис. 10 представлены поля интенсивности тензора деформаций. Видно, что за счет податливости внутреннего защитного слоя удастся перераспределить контактные силы на значительно большую площадь, снизив их величины и изменив направление действия.

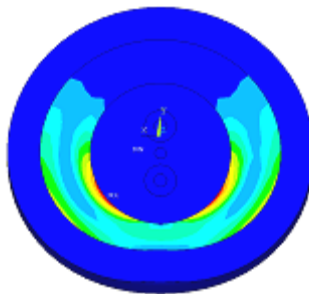


Рис. 10. Интенсивность тензора деформаций в плоскости поперечного сечения

В результате численного исследования установлено, что двулучепреломление в районе микроизгиба незначительно, в пределах 1,3 %, отличается от значения, полученного для свободного волокна, влияние дефекта носит локальный характер и с удалением от зоны контакта стремится к нулю (рис. 11).

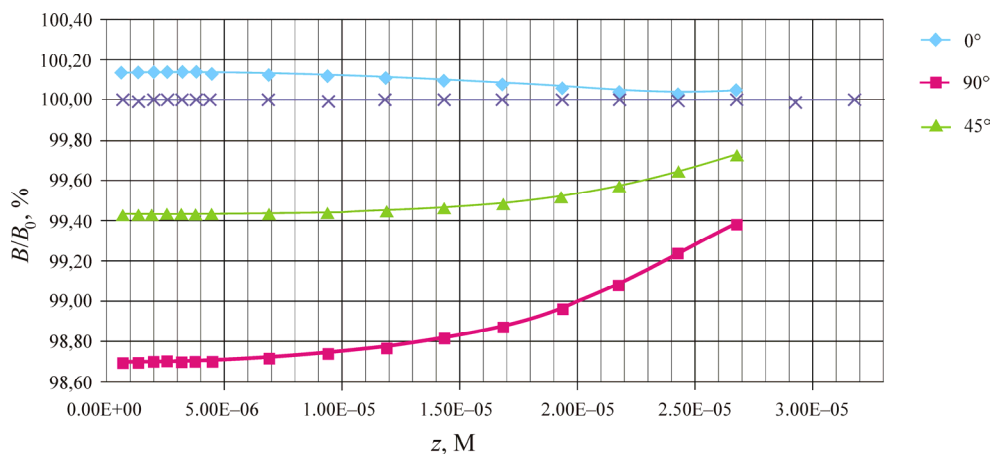


Рис. 11. Относительное изменение модового двулучепреломления по длине волокна для трех вариантов ориентации поперечного сечения ($\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 45^\circ$)

Влияние ориентации волокна относительно оправки в районе микроизгиба также оказалось незначительным (рис. 12).

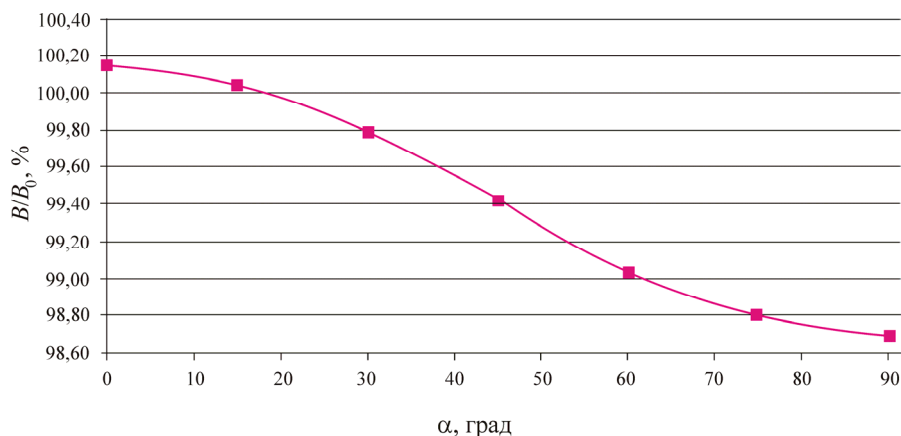


Рис. 12. Зависимость двулучепреломления световода от ориентации волокна относительно оправки в районе микроизгиба

В результате исследования построена математическая модель и разработана процедура ее численной реализации. Полученная зависимость двулучепреломления от силы натяжения волокна при намотке на оправку $B(F_n)$ линейна, что согласуется с ранее опубликованными результатами [6]. Определено, что двулучепреломление практически не зависит от диаметра катушки и ориентации сечения волокна. Установлено, что величина модового двулучепреломления в сечении над точкой микроизгиба отличается от двулучепреломления свободного волокна не более чем на 1,3 % (при усилии намотки $F_n = 0,2$ Н). С удалением от дефекта значения двулучепреломления стремятся к двулучепреломлению свободного волокна (см. рис. 12).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранта РФФИ, проект № 16-48-590660 p_a.

Список литературы

1. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors // Opt. Fiber Technol. – 2003. – № 9. – P. 57–79. DOI: 10.1016/S1068-5200(02)00527-8
2. Bao X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors // Sensors. – 2012. – № 12. – P. 8601. DOI: 10.3390/s120708601
3. Karimi M., Sun T., Grattan K.T.V. Design evaluation of a high birefringence single mode optical fiber-based sensor for lateral pressure monitoring applications // IEEE Sens. J. – 2013. – № 13. – P. 4459–4464. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2265294
4. 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. – № 31. – P. 83–91. DOI: 10.1016/j.yofte.2016.06.004
5. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber / R. Guan, X. Wang, X. Wang, D. Huang, S. Liu // Chin. Opt. Lett. – 2005. – № 3. – P. 42–45.
6. Ulrich R., Rashleigh S. Polarization coupling in kinked single-mode fibers // IEEE J. Quantum Electron. – 1982. – № 18. – P. 2032–2039. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071484

7. Bløtekjær K. Strain distribution and optical propagation in tension-coiled fibers // *Opt. Lett.* – 1993. – № 18. – P. 1059. DOI: 10.1364/OL.18.001059

8. Trufanov A.N., Trufanov N.A., Semenov N.V. Evolution of technological stress fields in cylindrical stress applying rods for the Panda-type optical fiber during annealing // *World Applied Sciences Journal.* – 2013. – Vol. 26, № 10. – P. 1272–1275.

References

1. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 2003, no. 9, pp. 57-79. DOI: 10.1016/S1068-5200(02)00527-8

2. Bao X., Chen L., Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 2012, no. 12, p. 8601. DOI:10.3390/s120708601

3. Karimi M., Sun T., Grattan K.T.V. Design evaluation of a high birefringence single mode optical fiber-based sensor for lateral pressure monitoring applications. *IEEE Sensor Journal*, 2013, no. 13, pp. 4459-4464. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2265294

4. 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. *Optical Fiber Technology*, 2016, no. 31, pp. 83-91. DOI: 10.1016/j.yofte.2016.06.004

5. Guan R., Wang X., Wang X., Huang D., Liu S. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber. *Chinese Optics Letters*, 2005, no. 3, pp. 42-45.

6. Ulrich R., Rashleigh S. Polarization coupling in kinked single-mode fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, no. 18, pp. 2032-2039. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071484

7. Bløtekjær K. Strain distribution and optical propagation in tension-coiled fibers. *Optics Letters*, 1993, no. 18, p. 1059. DOI: 10.1364/OL.18.001059

8. Trufanov A.N., Trufanov N.A., Semenov N.V. Evolution of technological stress fields in cylindrical stress applying rods for the Panda-type optical fiber during annealing. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 26, no. 10, pp. 1272-1275.