

УДК 681.7.068: 539.376

**А.Н. Труфанов, Н.А. Труфанов**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**О МОДЕЛЯХ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
В АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

Обсуждаются вопросы построения математических моделей на основе уравнений механики деформируемого твердого тела для прогнозирования наведенных механических напряжений и двулучепреломления в анизотропных оптических волокнах. Отмечено, что получившие широкое распространение термоупругие модели появления остаточных напряжений связывают исключительно с несовместностью температурных деформаций материалов силовых элементов и температурных деформаций чистого кварца, из которого изготовлено волокно. В такой постановке величины прогнозируемых напряжений не зависят от скорости охлаждения и закона изменения температуры во времени, а оказываются прямо пропорциональны разности температур: конечной (комнатной) и начальной, в качестве которой в разных источниках выбираются температура разогрева заготовки при вытяжке, температура стеклования легированного кварцевого стекла, некоторая «фиктивная» температура, соответствующая появлению упругих свойств при охлаждении расплава, а в ряде публикаций эта температура вообще не конкретизирована и, по сути, может выступать в качестве «подгоночного» параметра. На конкретных примерах иллюстрируется применение релаксационных механических моделей максвелловского типа, рассматривающих материал анизотропного волокна как неоднородно легированную среду, обладающую неоднородными реологическими свойствами и релаксационными переходами, которые происходят в различных температурных диапазонах, причем положение температурного диапазона зависит от скорости изменения температуры. Установлено количественное отличие прогнозируемого двулучепреломления на основе двух данных подходов на примере волокна типа Panda.

**Ключевые слова:** анизотропные оптические волокна, внутренние механические напряжения, двулучепреломление, релаксационные явления.

**A.N. Trufanov, N.A. Trufanov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**MODELS OF THE FORMATION OF THE STRESS STATE  
IN PM OPTICAL FIBERS**

The problems of mathematical modeling of induced stresses and birefringence in anisotropic optical fibers were studied. Noted that found wide spread thermoelastic models associate the formation of residual stresses exclusively with the incompatibility of thermal deformations of the structural elements of the fiber. In this formulation, the value of the predicted stresses do not depend on the cooling rate and the law of temperature change over time, and are directly proportional to the temperature difference: the final (ambient temperature) and initial, as in different sources which are selected heating temperature of the preform during drawing, the glass transition temperature of doped silica glass or some "fictive" temperature, which corresponding to the appearance of the elastic properties of the cooled melt, and in a number of publications, this temperature is not at all focused and in fact can act as

a "fitting" parameter. Were shown a some examples of the application of the relaxation mechanical models of Maxwell type for modeling of the anisotropic optical fibers with non-uniform doping of light-guide core and stress applying parts, which has a non-uniform rheological properties and relaxation transitions that occur in different temperature ranges, and the position of the temperature range depends on the rate of cooling. Identified the quantitative difference between the predicted birefringence on the basis of these two approaches on the example of Panda type optical fiber.

**Keywords:** anisotropic optical fibers, internal stresses, birefringence relaxation phenomena.

В последние годы интенсивно разрабатываются волоконные световоды, способные сохранять состояние поляризации вводимого в него излучения, так называемые анизотропные одномодовые световоды, находящие широкое применение в волоконно-оптических датчиках различных физических величин [1, 2]. Анизотропное кварцевое оптическое волокно получается по технологии высокотемпературной вытяжки из заготовки с последующим охлаждением [3–5]. В таком волокне с использованием известных фотоупругих эффектов для поддержания поляризации светового сигнала в светопроводящей жиле искусственно, путем введения в конструкцию волокна специальных силовых элементов с отличным от остального материала коэффициентом термического расширения, создается анизотропия поля внутренних напряжений. Напряженное состояние анизотропного световода определяется совокупностью факторов, связанных со свойствами материалов и условиями технологических процессов: неоднородностью температурных полей при охлаждении после высокотемпературной обработки, несовместностью температурных деформаций неоднородно легированных элементов, терморелаксационными переходами (стеклование-размягчение), происходящими из-за неоднородного легирования в различных температурных диапазонах.

Многие исследования посвящены построению математических моделей на основе уравнений механики деформируемого твердого тела для прогнозирования наведенных механических напряжений в анизотропных волокнах и, как следствие, двулучепреломления световода [6–17]. Большинство авторов используют в этих целях уравнения термоупругости, соответствующие случаю плоской или обобщенной плоской деформации. При этом предполагается, что в процессе охлаждения после вытяжки можно пренебречь градиентами температур по радиусу волокна (что подтверждается расчетами), а появление остаточных напряжений связано исключительно с несовместностью температурных деформаций материалов силовых элементов, представляющих, как правило, кварц, легированный оксидом бора  $B_2O_3$  и фосфорным ан-

гидридом  $P_2O_5$ , и температурных деформаций чистого кварца  $SiO_2$ , из которого изготовлено волокно. В такой постановке величина прогнозируемых напряжений не зависит от скорости охлаждения и закона изменения температуры во времени, а оказывается прямо пропорциональной разности температур: конечной (комнатной) и начальной, в качестве которой в разных источниках выбираются температура разогрева заготовки при вытяжке, температура стеклования кварца, легированного оксидом бора [7], некоторая «фиктивная» температура, соответствующая появлению упругих свойств при охлаждении расплава [10], а в ряде статей эта температура вообще не конкретизирована и, по сути, может выступать в качестве «подгоночного» параметра [12–17].

Применение такого рода склерономных моделей, нечувствительных к режиму охлаждения стеклующихся изделий, может быть оправданным в качестве первого приближения. При этом за рамками рассмотрения оказываются важные релаксационные механизмы, которые могут существенным образом повлиять на закономерности формирования полей внутренних напряжений. Многие аморфные материалы (в том числе неорганические стекла) обладают так называемым релаксационным переходом, когда материал при охлаждении переходит из вязкотекучего состояния в застеклованное (явление стеклования) или, наоборот, при нагреве из застеклованного – в вязкотекучее (размягчение). Явление стеклования не сопровождается структурными превращениями (т.е. не является фазовым переходом) и связано со значительным изменением жесткости и релаксационного спектра материала. На релаксационные свойства кварцевых стекол значительное влияние могут оказывать добавки различных оксидов; так, для элементов оптических волокон используется легирование оксидом бора  $B_2O_3$ , оксидом германия  $GeO_2$ , фосфорным ангидридом  $P_2O_5$  и др. Оксид бора, например, существенно увеличивает коэффициент линейного температурного расширения легированного кварцевого стекла, но снижает его вязкость и температуру стеклования. Вследствие этого материал анизотропного волокна представляет собой неоднородно легированную среду, обладающую неоднородными реологическими свойствами и релаксационными переходами, которые происходят в различных температурных диапазонах, причем положение температурного диапазона зависит от скорости изменения температуры.

Учет реономных свойств кварцевых стекол возможен в рамках довольно простых определяющих соотношений, связывающих тензоры напряжений и деформаций (скоростей деформаций). Поскольку известно, что в застеклованном состоянии кварцевое стекло проявляет линейно-упругое поведение, а в полностью размягченном состоянии – поведение линейно-вязкой жидкости с сильной зависимостью вязкости от температуры, можно воспользоваться обобщением на сложное напряженное состояние вязкоупругой модели Максвелла (последовательное соединение упругого и вязкого элементов).

Для исследования на качественном уровне эффектов, связанных с охлаждением изделий из кварцевых стекол, рассмотрим задачу о напряжениях в одноосном защемленном стержне.

В этом случае несвязанная квазистатическая краевая задача о напряженно-деформированном состоянии с учетом малости деформаций и незначительности вклада массовых сил включает:

– уравнение равновесия:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad x \in l,$$

– геометрические соотношения Коши:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad x \in l,$$

где  $u(x, t)$  – перемещение вдоль оси  $x$ ;  $\varepsilon(x, t)$  – полная деформация, а также граничные условия в перемещениях и напряжениях.

В качестве определяющих используем соотношения максвелловского типа:

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T - \varepsilon_B), \quad \frac{\partial \varepsilon_B}{\partial t} = \frac{\sigma}{\eta(T)}, \quad \varepsilon_T = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT.$$

В настоящее время физико-механические свойства и константы чистого кварцевого стекла достаточно хорошо изучены [4]. Модуль упругости растет от 6500 кг/мм<sup>2</sup> при комнатной температуре до значительных, на 9–11 % больших при  $T = 1200$  °С, при этом коэффициент Пуассона линейно изменяется от 0,17 до 0,2. Коэффициент температурного расширения чистого кварца мал ( $5 \cdot 10^{-7}$  К<sup>-1</sup>) и примерно по-

стоянен в области температур стеклообразного состояния. Напротив, зависимость вязкости от температуры существенна.

Для аппроксимации зависимости вязкости от температуры применим соотношения Аррениуса вида

$$\lg(\eta(T)) = K_1 + \frac{K_2}{T}, \quad (1)$$

где  $K_1 = -5,4154$ ,  $K_2 = 2,2316 \cdot 10^4$ .

На первом этапе (рис. 1) образец охлаждается с постоянной скоростью от температуры, превышающей температуру стеклования  $T_g$ . На втором этапе производится разгрузка стержня. На третьем этапе ненапряженный стержень, защемленный с обоих концов, равномерно с постоянной скоростью нагревается. Напряжение возрастает за счет температурного расширения до тех пор, пока температура не превысит температуру размягчения материала. При дальнейшем нагреве происходит резкий спад напряжений, что объясняется уменьшением характерных времен релаксации до величин, сопоставимых со временем проведения эксперимента за счет уменьшения вязкости. Отметим, что при использовании термоупругой модели было бы возможным описание поведения материала только при температурах ниже  $T = 1200$  °C: линейный рост напряжений при охлаждении с существенной ошибкой в их величине и линейное увеличение сжимающих напряжений при нагреве без релаксации.

При варьировании скорости охлаждения и нагрева удастся описать физически известный факт, что температура стеклования меняет свои значения. Для скоростей нагрева  $\dot{T} = 1...20$  °C/мин получено семейство кривых (рис. 2). Обратим внимание на тот факт, что эти кривые квазипараллельны, и воспользуемся им для построения зависимости температуры размягчения от скорости нагрева (рис. 3). Заметим, что при увеличении скорости охлаждения рост температуры стеклования замедляется.

Описанные релаксационные эффекты могут играть существенную роль при анализе процессов, сопровождающих изготовление анизотропных оптических волокон, особенно в силу их неоднородности вследствие легирования материалов силовых стержней и светопроводящей жилы. В качестве иллюстрации приведем пример о напряжениях

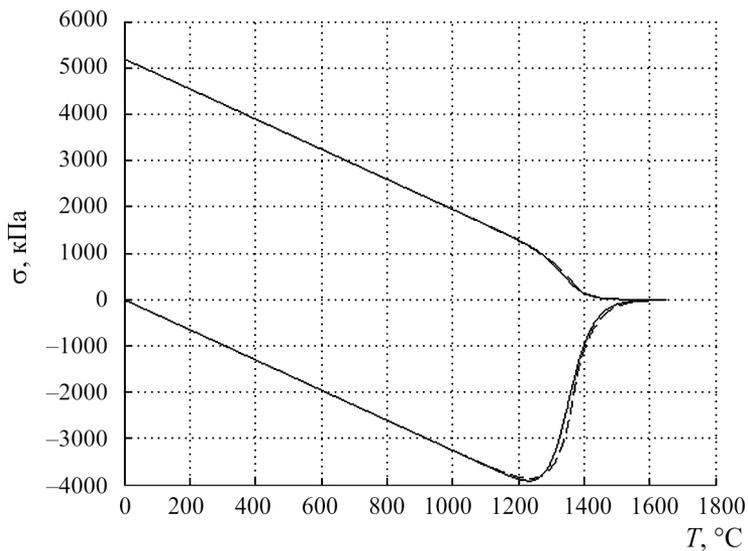


Рис. 1. Термомеханическая кривая заземленного кварцевого образца при скорости охлаждения и нагрева  $\dot{T} = 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$

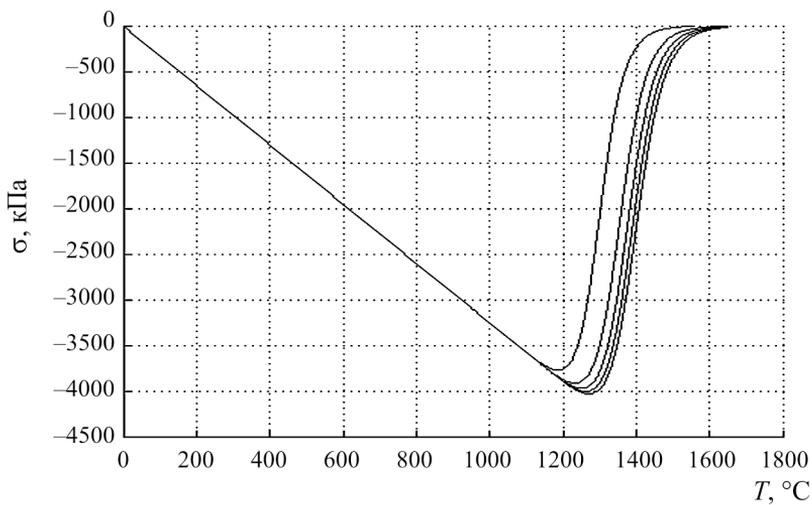


Рис. 2. Семейство термомеханических кривых заземленного кварцевого образца при скоростях охлаждения  $\dot{T} = 1 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$

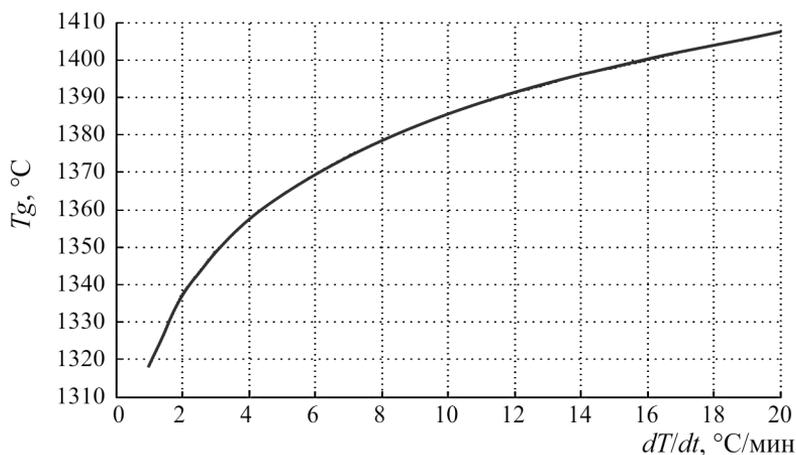


Рис. 3. Зависимость температуры размягчения от скорости нагрева  $\dot{T}$

в защемленном стержне из чистого кварцевого стекла и кварцевого стекла, легированного оксидом бора (10 %  $B_2O_3$ ) в режимах изменения температур, имитирующих отжиг стержней. На рис. 4 представлено изменение напряжения в условиях нагрева стержня с постоянной скоростью до некоторой температуры с последующей выдержкой при фиксированной температуре (950, 1050, 1150 °C) и охлаждением до комнатной температуры, что соответствует режиму отжига. Приведенные зависимости позволяют оценить необходимое время выдержки для полной релаксации напряжений в стержне при выбранной температуре отжига. На рис. 5 изображены аналогичные зависимости для защемленного стержня из кварцевого стекла, легированного 10 % оксида бора. Введение оксида бора в состав кварцевого стекла приводит к снижению вязкости расплава, уменьшению температуры стеклования и увеличению линейного коэффициента температурного расширения [4]. Видно, что полная релаксация напряжений в легированном кварцевом стекле при данных температурах и выбранной скорости нагрева (образцы нагревались до температуры выдержки за 100 с) происходит еще в процессе нагрева и выдержки фактически не требуется.

Произведено обобщение модели максвелловского типа на случай сложного напряженного состояния, разработан и реализован алгоритм численной реализации. Основные уравнения, метод решения и примеры применения для задачи о формировании остаточных напряжений в силовых стержнях представлены в работах [18, 19]. В данном случае, следуя методологии работ [18, 19], покажем, что дает применение

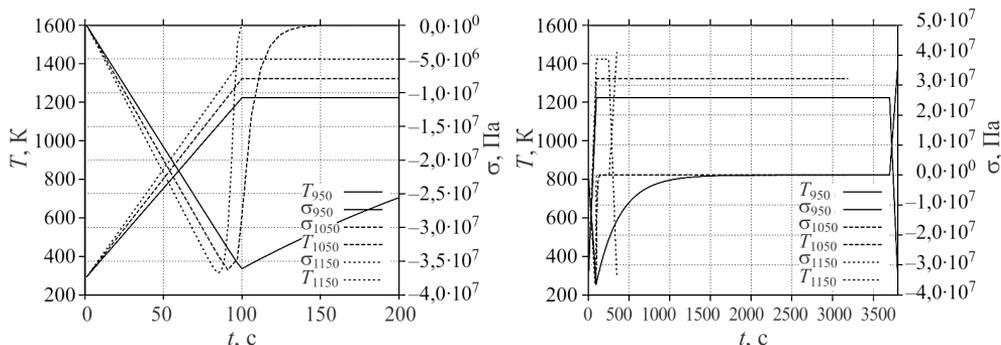


Рис. 4. Эволюция напряжения и температуры в заземленном стержне из чистого кварцевого стекла в режимах: нагрев – выдержка (при фиксированных температурах) – охлаждение (до комнатной температуры)

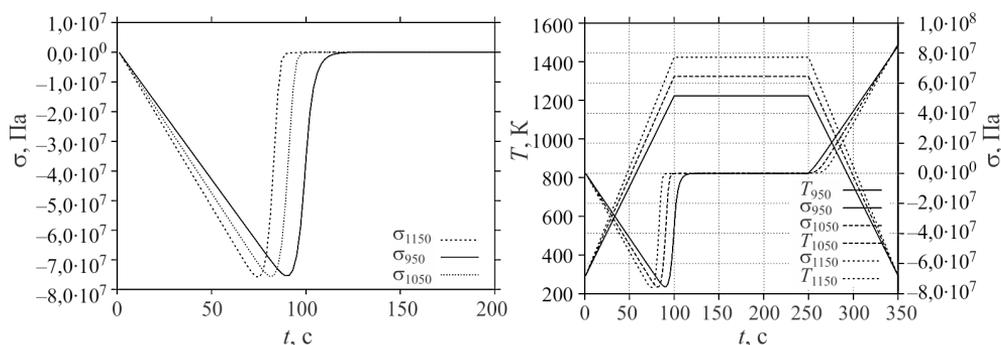


Рис. 5. Эволюция напряжения и температуры в заземленном стержне из кварцевого стекла легированного 10 %  $B_2O_3$  в режимах: нагрев – выдержка (при фиксированных температурах) – охлаждение (до комнатной температуры)

релаксационной модели при прогнозировании полей напряжений и двулучепреломления в волокне типа Panda по сравнению с традиционными термоупругими расчетами. На рис. 6 приведена фотография поперечного сечения анизотропного волокна типа Panda, состоящего из следующих конструктивных элементов: светопроводящая жила в центре волокна из кварцевого стекла, легированного оксидом германия, два силовых цилиндрических элемента из кварцевого стекла, легированного оксидами бора и фосфора и оксидом бора в центральной части, массив самого волокна выполнен из чистого кварцевого стекла.

Для сравнения моделей были выполнены численные исследования с применением термоупругой модели и релаксационной модели (три варианта с учетом разных скоростей охлаждения волокна после вытяжки до комнатной температуры). На рис. 7 представлены результаты

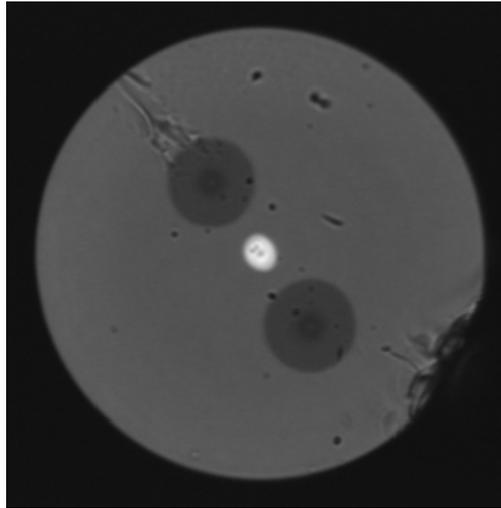


Рис. 6. Поперечное сечение анизотропного волокна типа Panda

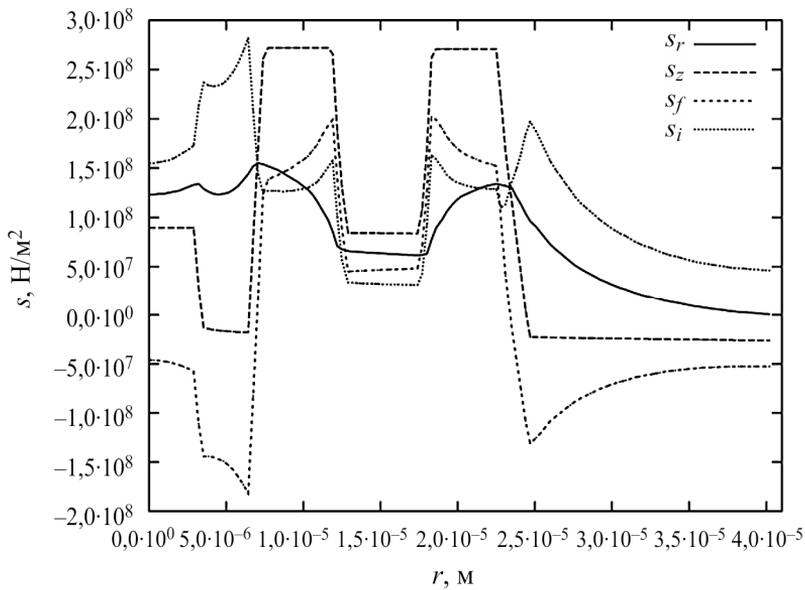


Рис. 7. Эпюры остаточных напряжений в анизотропном волокне типа Panda после вытяжки, полученные с применением термоупругой модели

решения задачи об остаточных напряжениях в анизотропном волокне в упругой постановке, на рис. 8 – с применением модели максвелловского типа. На качественном уровне результаты схожи, однако количественно существенно отличаются. На рис. 9 приведено сравнение релаксационной и термоупругой моделей на примере эпюр интенсивности

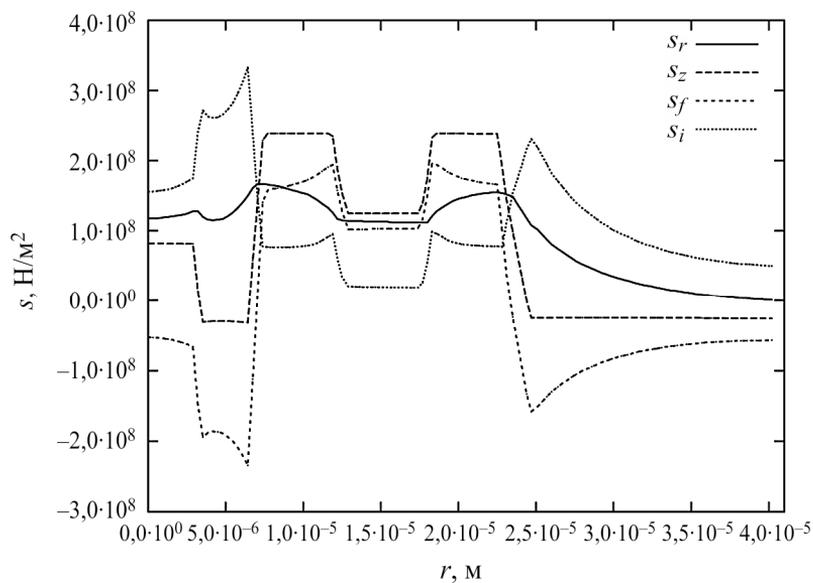


Рис. 8. Эпюры остаточных напряжений в анизотропном волокне типа Panda после вытяжки, полученные с применением релаксационной модели (охлаждение волокна за 4,6 с)

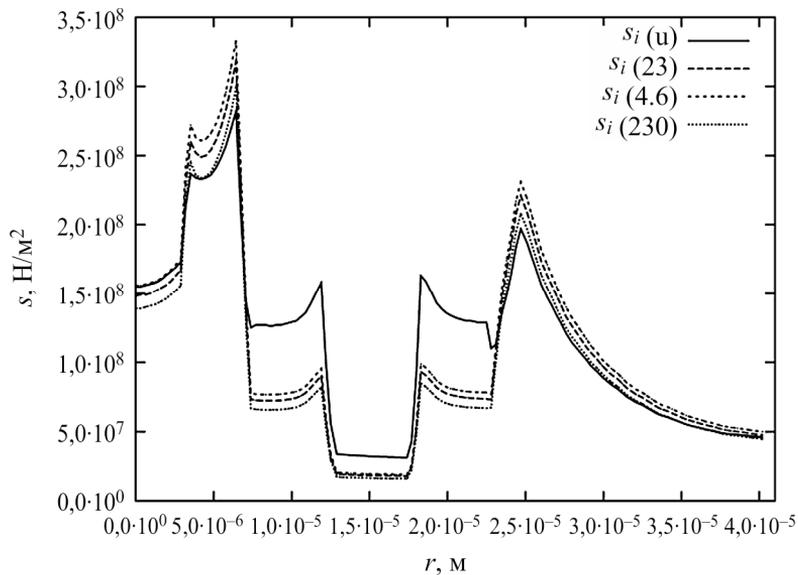


Рис. 9. Эпюры интенсивности напряжений  $S_i$  в анизотропном волокне типа Panda, полученные с применением релаксационной и термоупругой моделей

напряжений для разного времени охлаждения волокна до комнатной температуры (4,6; 23; 230 с).

Количественные отличия в определении компонент тензора напряжений в различных точках поперечного сечения световода на основе двух обсуждаемых подходов сказываются в конечном счете на величине прогнозируемого двулучепреломления, определяемого по формуле

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

где  $r, \varphi$  – соответствующие оси цилиндрической системы координат;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – 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 световода. В данном исследовании было использовано равномерное распределение  $E(r, \varphi, V) = E_0$ .

Значения двулучепреломления  $B$ , полученные для указанных выше четырех расчетных вариантов, приведены в таблице.

Расчетные значения двулучепреломления анизотропного волокна типа Panda

Вариант расчета	Время охлаждения, с	$B \cdot 10^4$
Расчет по термоупругой модели	–	5,75
Расчет по термовязкоупругой модели	4,6	6,05
	23	5,77
	230	5,40

Таким образом, показано, что учет релаксационных механических явлений в материалах кварцевого анизотропного световода может оказаться существенным при прогнозировании важной оптической характеристики волокна – двулучепреломления. В данном подходе отсутствует необходимость использования субъективно выбираемого параметра – начальной температуры процесса охлаждения («фиктивной температуры»).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-96036 р\_урал\_а и № 14-08-31530 мол\_а).*

### Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики: пер. с япон. / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Каюма, К. Хататэ; под ред. Т. Окоси. – Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1990. – 256 с.
2. Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
3. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учеб. пособие. – М.: МГУЛ, 2007. – 222 с.
4. Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.П. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов: справ. – Т. 1–5. – Л.: Наука, 1973–1987.
5. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology. – 2nd ed. / The Royal Society of Chemistry. – Cambridge, 2005. – 291 p.
6. Kaminov I.P., Ramaswamy V. Single-polarization optical fibers: Slab model // Applied Physics Letters. – 1979. – Vol. 34. – P. 268–270. Doi: 10.1063/1.90754.
7. Okamoto K., Hosaka T., Edahiro T. Stress analysis of optical fibers by a finite element method // IEEE J. Quantum Electron. – 1981. – Vol. QE-17, no. 10. – P. 2123–2129.
8. Namihira Y., Ejiri Y., Mochizuki K. Birefringence in elliptical-cladding single polarization fibers // Electron. Lett. – 1982. – Vol. 18, no. 2. – P. 89–91.
9. Sakai J., Kimura T. Birefringence caused by thermal stress in Elliptically deformed core optical fibers // IEEE J. Quantum Electron. – 1982. – Vol. QE-18, no. 11. – P. 1899–1909.
10. Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers / M.P. Varnham, D.N. Payne, A.J. Barlow, R.D. Birch // IEEE J. of Lightwave Technology. – 1983. – Vol. LT-1, no. 2. – P. 332–338.
11. Оптические свойства эллиптических одномодовых световодов / З.Э. Арутюнян, А.Б. Грудинин, А.Н. Гурьянов, Д.Д. Гусовский, С.В. Игнатьев, О.Б. Смирнов, С.Ю. Сурин // Волоконная оптика: тр. ИОФАН. – М.: Наука, 1993. – Т. 39. – С. 119–147.
12. Fontaine M. Computations of optical birefringence characteristics of hingly eccentric elliptical core fibers under various thermal stress conditions // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 75, no. 1. – P. 68–73.

13. Aly M.H., Abouelwafa M.S.A., Keshk M.M. Thermal-stress-induced birefringence in Panda and bow-tie optical fibers // Proceedings of the Fifteenth National Radio Science Conference. – Helman, Cairo, 1998. – P. (D14) 1–11.

14. Stress analysis of polarization maintaining optical fibers by the finite element method / M.H. Aly, A.S. Farahat, M.S. Helmi, M. Farhoud // ИИУМ Engineering Journal. – 2000. – Vol. 1, no. 1. – P. 7–14.

15. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers / R. Guan, F. Zhu, Z. Gan, D. Huang, S. Liu // Optical Fiber Technology. – 2005. – No.11. – P. 240–254. DOI: 10.1016/j.yofte.2004.10.002.

16. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber / R. Guan, W. Xueli, W. Xuefang, D. Huang, S. Liu // Chinese Optics Letters. – 2005. – Vol. 3, no. 1. – P. 42–45.

17. Alam M.S., Anwar S.R.M. Modal propagation properties of elliptical core optical fibers considering stress-optic effects // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 4, no. 8. – P. 418–423.

18. Trufanov A. N., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers // Optical Fiber Technology. – 2010. – Vol. 16, no. 3. – P. 156–161.

19. Труфанов А.Н. Эволюция полей технологических напряжений в цилиндрическом силовом стержне для заготовки оптоволокна типа Panda в процессе отжига // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 1. – С. 210–220.

## References

1. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kauma K., Hatate K. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber Optic Sensors]. Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 256 p.

2. Grodnev I.I., Larin Iu.T., Teumin I.I. Opticheskie kabeli: konstruktsii, kharakteristiki, proizvodstvo i primeneniye [Optical cables: design, characterization, production and application]. Moscow: Energosamizdat, 1991, 264 p.

3. Burkov V.D., Ivanov G.A. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoi tekhniki [Physical and technological basis of fiber-optic technology]. Moscow, 2007, 222 p.

4. Mazurin O.V., Strel'tsina M.V., Shvaiko-Shvaikovskaia T.P. Svoistva stekol i stekloobrazuiushchikh rasplavov [Silica glass and binary silicate glasses]. Leningrad: Nauka, 1973–1987, vol. 1–5.

5. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005, 291 p.

6. Kaminov I.P., Ramaswamy V. Single-polarization optical fibers: Slab model. *Applied Physics Letters*, 1979, vol. 34, pp. 268-270. Doi: 10.1063/1.90754.

7. Okamoto K., Hosaka T., Edahiro T. Stress analysis of optical fibers by a finite element method. *IEEE J. Quantum Electron*, 1981, vol. QE-17, no. 10, pp. 2123-2129.

8. Namihira Y., Ejiri Y., Mochizuki K. Birefringence in elliptical-cladding single polarization fibers. *Electron. Lett.*, 1982, vol. 18, no. 2, pp. 89-91.

9. Sakai J., Kimura T. Birefringence caused by thermal stress in Ellipticaly deformed core optical fibers. *IEEE J. Quantum Electron*, 1982, vol. QE-18, no. 11, pp. 1899-1909.

10. Varnham M.P., Payne D.N., Barlow A.J., Birch R.D. Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers. *IEEE J. of Lightwave Technology*, 1983, vol. LT-1, no. 2, pp. 332-338.

11. Arutiunian Z.E., Grudin A.B., Gurianov A.N., Gusovskii D.D., Ignatev S.V., Smirnov O.B., Surin S.Iu. Opticheskie svoistva ellipticheskikh odnomodovykh svetovodov [The optical properties of elliptic singlemode fiber optic cable]. *Trudy Instituta obshchei fiziki "Volokonnaya optika"*. Moscow: Nauka, 1993, vol. 39, pp. 119-147.

12. Fontaine M. Computations of optical birefringence characteristics of hingly eccentric elliptical core fibers under various thermal stress conditions. *J. Appl. Phys.*, 1994, vol. 75, no. 1, pp. 68-73.

13. Aly M.H., Abouelwafa M.S.A., Keshk M.M. Thermal-stress-induced birefringence in Panda and bow-tie optical fibers. *Proceedings of the Fifteenth National Radio Science Conference*. Helwan, Cairo, 1998, pp. (D14) 1-11.

14. Aly M.H., Farahat A.S., Helmi M.S., Farhoud M. Stress analysis of polarization maintaining optical fibers by the finite element method. *IJUM Engineering Journal*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 7-14.

15. Guan R., Zhu F., Gan Z., Huang D., Liu S. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2005, no. 11, pp. 240-254. DOI: 10.1016/j.yofte.2004.10.002.

16. Guan R., Wang Xueli, Wang Xuefang, Huang D., Liu S. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber. *Chinese Optics Letters*, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 42-45.

17. Alam M.S., Anwar S.R.M. Modal propagation properties of elliptical core optical fibers considering stress-optic effects. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, vol. 4, no. 8, pp. 418-423.

18. Trufanov A.N., Smetannikov O.Iu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 156-161.

19. Trufanov A.N. Evolyutsiya poley tehnologicheskikh napryazheniy v tsilindricheskom silovom sterzhne dlya zagotovki optovolokna tipa Panda v protsesse otzhiga. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2013, no. 1, pp. 210-220.

Получено 16.10.2014