

УДК 539.376

А.Н. Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СИЛОВОМ СТЕРЖНЕ ДЛЯ ЗАГОТОВКИ ОПТОВОЛОКНА ТИПА PANDA В ПРОЦЕССЕ ОТЖИГА

Исследованы закономерности эволюции полей технологических напряжений в цилиндрическом силовом стержне для заготовки оптоволокна типа Panda в процессе отжига. Реализована математическая модель формирования технологических напряжений, построенная на основе соотношений линейной термовязкоупругости, в температурных режимах, соответствующих технологическому процессу отжига силового стержня. Установлены количественные характеристики релаксации напряжений в различных условиях протекания процесса отжига. Выявлены режимы, приводящие к максимально возможному снижению опасных растягивающих нормальных напряжений и интенсивности тензора напряжений. Установлено, что для стержней, закон легирования в которых близок к равномерному, процесс отжига является более эффективным, чем для стержней с законами легирования, близкими к параболическому.

Ключевые слова: технологические напряжения, остаточные напряжения, анизотропное оптическое волокно, релаксационный переход, отжиг.

A.N. Trufanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EVOLUTION OF TECHNOLOGICAL STRESS FIELDS IN CYLINDRICAL STRESS APPLYING ROD FOR OPTICAL FIBER PANDA-TYPE DURING ANNEALING

Investigated evolution regularities of the technological stress fields in the rod for preform of fiber Panda type during annealing. It is shown that the main reason of reducing the levels of the stress state is the relaxation, due to viscous deformation of silica glass in the temperature range of the glass transition. Implemented mathematical model of technological stresses formation in stress applying rod, on the basis of linear thermoviscoelasticity relations in conditions of annealing. Numerical analysis performed using finite element method (FEM). Identified the quantitative characteristics of stress relaxation in different process conditions of annealing. Defined modes that provide the maximum possible reduction of hazardous tensile normal stress and intensity of the stress tensor. Found that for the rod with uniform doping, the annealing process is more efficient than for the rod doped with regularity close to parabolic.

Keywords: technological stresses, residual stresses, polarization maintaining fiber, relaxation transition, annealing.

В последние годы интенсивно разрабатываются волоконные световоды, способные сохранять состояние поляризации вводимого в него излучения. Это так называемые анизотропные одномодовые световоды, находящие широкое применение в волоконно-оптических датчиках различных физических величин [1]. Анизотропное кварцевое оптическое волокно изготавливается по технологии высокотемпературной вытяжки заготовки из кварцевого стекла с последующим охлаждением [2, 3]. 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. Некоторые виды анизотропных волокон описаны в [4, 5]. Наиболее технологичным и эффективным на сегодняшний день является вариант волокна типа Panda, в котором в качестве силовых элементов используются два цилиндрических стержня из кварцевого стекла, имеющих неоднородное легирование вдоль радиуса. Процесс изготовления таких стержней сопровождается формированием полей остаточных технологических напряжений достаточно высокого уровня, что может приводить к разрушению стержня на этапе изготовления [6–8]. Снижения остаточных напряжений можно добиться путем реализации технологии дополнительного высокотемпературного отжига [2].

В данной работе на основе математического моделирования даны оценки влияния высокотемпературного отжига на эволюцию напряженного состояния в силовом стержне в процессе его изготовления. Представляется, что основным механизмом снижения уровней напряженного состояния при отжиге является механизм релаксации напряжений вследствие вязких деформаций кварцевого стекла в диапазоне температур стеклования (который соответствует релаксационному переходу в материале из застеклованного в вязкотекучее состояние). Обоснование выбора математической модели для описания поведения конструкций из легированных кварцевых стекол в широком диапазоне температур, включающем релаксационный переход, содержится в статьях [9, 10]. Для исследования на качественном уровне закономерностей протекания термомеханических процессов в режиме отжига решена задача об эволюции одноосного напряженного состояния в заземленном стержне из чистого кварца, основные уравнения и метод

решения которой изложены в [3, 6–9]. На рис. 1 представлено изменение напряжения в условиях нагрева стержня с постоянной скоростью до некоторой температуры с последующей выдержкой при этой фиксированной температуре (950, 1050, 1150 °С) 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. 2 изображены аналогичные зависимости для заземленного 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 [11]. 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.

Численная реализация задачи термомеханики производилась пошаговым методом, подробно описанным в работах [6–9].

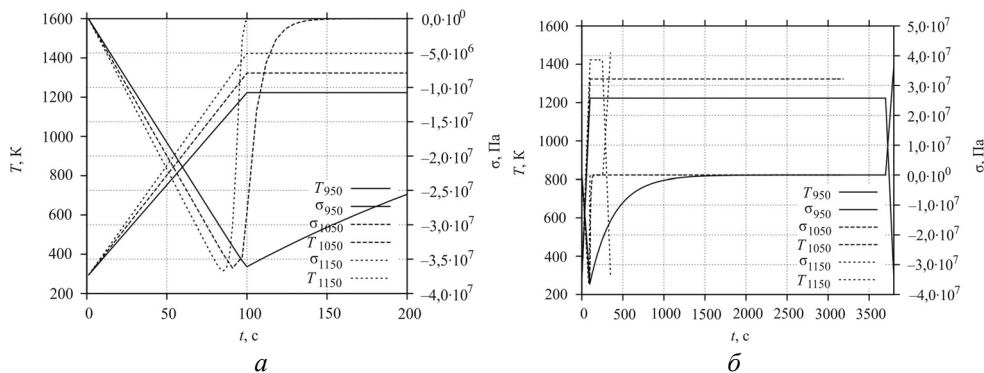


Рис. 1. Эволюция напряжения и температуры в заземленном стержне из чистого кварцевого стекла в режимах: нагрев – выдержка (при фиксированных температурах) – охлаждение (до комнатной температуры): *a* – временная шкала до 200 с; *б* – временная шкала до 3750 с

Был выполнен анализ эволюции напряжений в силовом стержне в процессе изготовления и отжига. Силовой стержень представлен цилиндром бесконечной длины с радиусом b , который до $r=r_0 < b$ имеет переменную по радиусу степень легирования кварца оксидом бора

B_2O_3 , $r = r_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ м – граница легированной зоны и чистого кварца; $r = b = 5 \cdot 10^{-3}$ м – радиус стержня. Для моделирования распределения концентрации легирующих добавок по радиусу использованы варианты зависимостей вида

$$\mu(r) = \mu_{\max} \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \right), \quad r \in [0, r_0]. \quad (1)$$

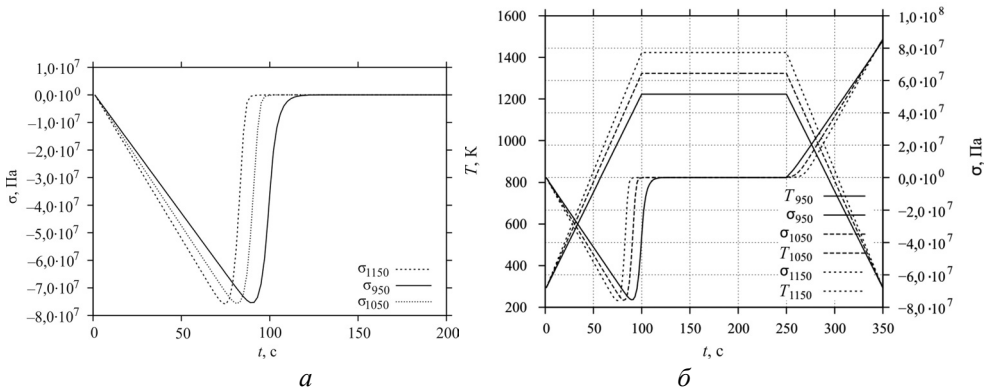


Рис. 2. Эволюция напряжения и температуры в заземленном стержне из кварцевого стекла, легированного 10 % B_2O_3 , в режимах: нагрев – выдержка (при фиксированных температурах) – охлаждение (до комнатной температуры): *a* – временная шкала до 200 с; *б* – временная шкала до 350 с

Рассматривались два случая легирования силового стержня по закону (1): с показателем $n = 40$ (распределение, близкое к равномерному) и $n = 2$. Постановка осесимметричной краевой задачи термомеханики стеклующегося неоднородно легированного кварцевого стержня и процедура ее решения методом конечных элементов подробно изложена в работах [6, 7].

На рис. 3 представлены эпюры остаточных напряжений в силовом стержне с $n = 40$ после изготовления. На рис. 4–7 показаны эпюры напряжений в этом же стержне после процедуры отжига, которая производилась соответственно при температурах 850, 950, 1050, 1150 °С. Рис. 8 демонстрирует эволюцию наиболее опасных с точки зрения прочности напряжений $\sigma_z(0)$ в центре силового стержня, интенсивности напряжений $\sigma_i(r_0)$ на границе легированной части и чистого кварца в процессе отжига при температуре 950 °С (сплошной линией отме-

чено изменение по процессу температуры) при $n = 40$ (на рис. 9 – напряжений при $n = 2$). Можно отметить, что отжиг при температуре $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению нормальных напряжений в центре стержня на 10 % и практически не влияет на интенсивность напряжений на границе с чистым кварцем. Отжиг при температуре $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению нормальных напряжений в центре стержня на 17 % и почти на 20 % снижает интенсивность напряжений на границе с чистым кварцем. Дальнейшее увеличение температуры отжига до 1050 и $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не приводит к существенному уменьшению напряжений.

Сравнение картин эволюции напряжений $\sigma_z(0)$ в центре силового стержня и интенсивности напряжений $\sigma_i(r_0)$ в процессе отжига при температуре $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $n = 40$ (см. рис. 8) и $n = 2$ (см. рис. 9) позволяет сделать вывод, что для стержней, закон легирования в которых близок к равномерному, процесс отжига является более эффективным, чем для стержней с законами легирования, близкими к параболическому. В частности, выбранный режим отжига приводит к полной релаксации напряжений в процессе пятичасовой выдержки при температуре $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ для $n = 40$, в то время как для $n = 2$ выдержка практически ничего не изменяет в величинах напряжений и проводить ее при данной температуре не имеет смысла.

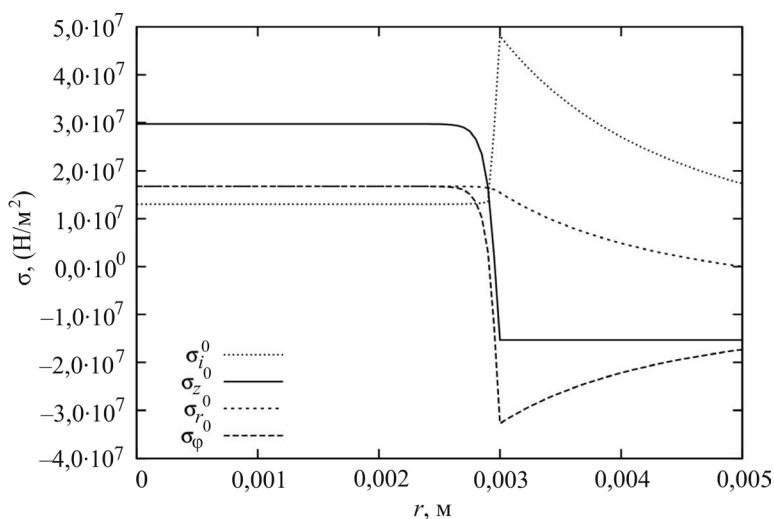


Рис. 3. Остаточные напряжения в силовом стержне после изготовления

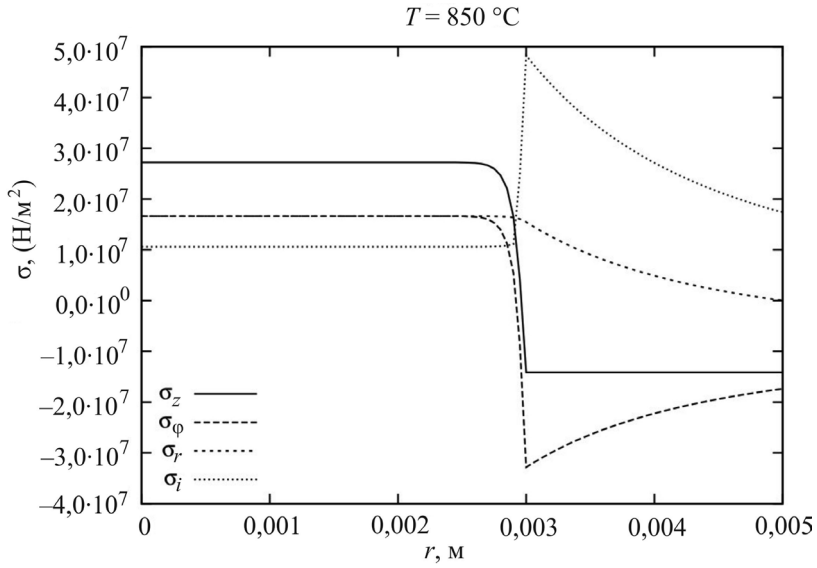


Рис. 4. Остаточные напряжения в силовом стержне после процедуры отжига при температуре $850 \text{ }^\circ\text{C}$

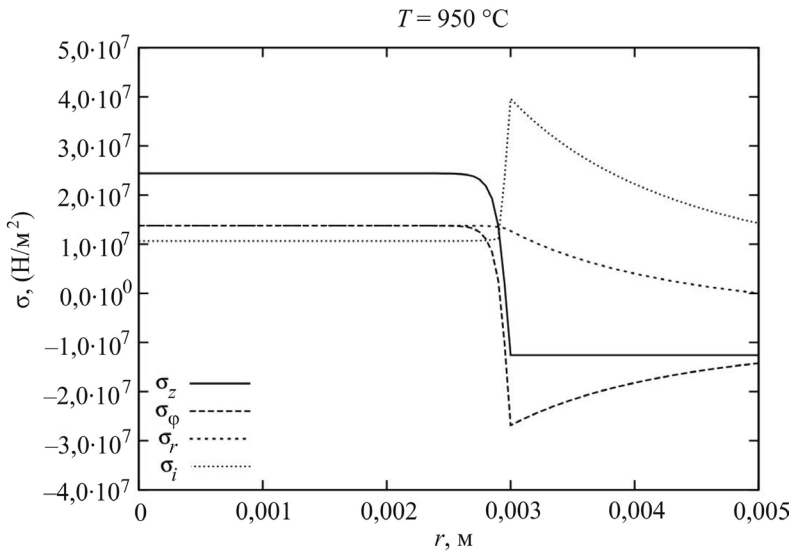


Рис. 5. Остаточные напряжения в силовом стержне после процедуры отжига при температуре $950 \text{ }^\circ\text{C}$

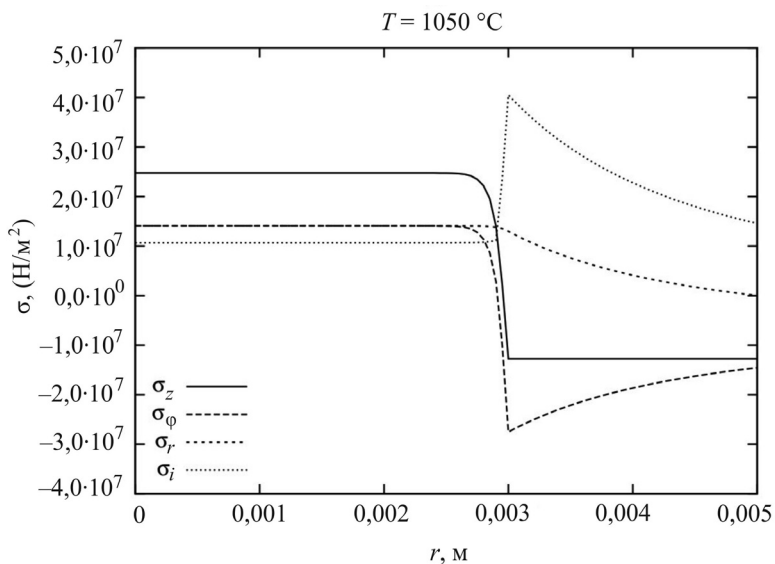


Рис. 6. Остаточные напряжения в силовом стержне после процедуры отжига при температуре 1050 °С

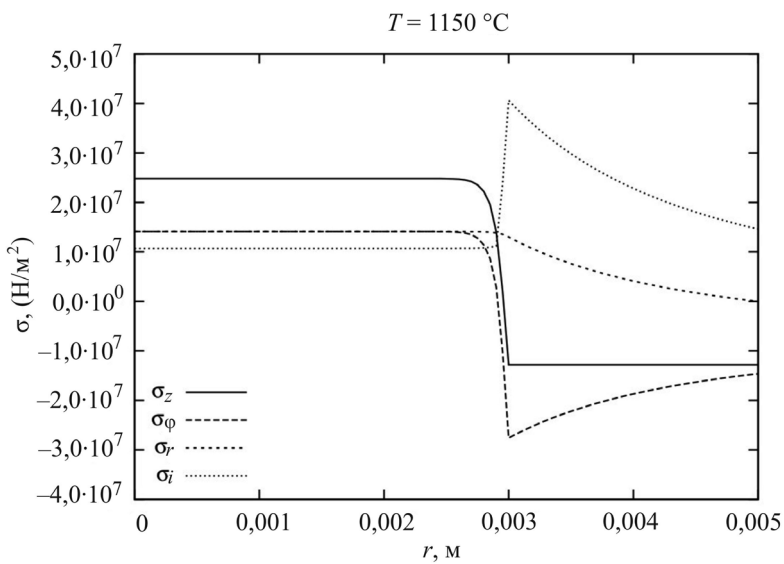


Рис. 7. Остаточные напряжения в силовом стержне после процедуры отжига при температуре 1150 °С

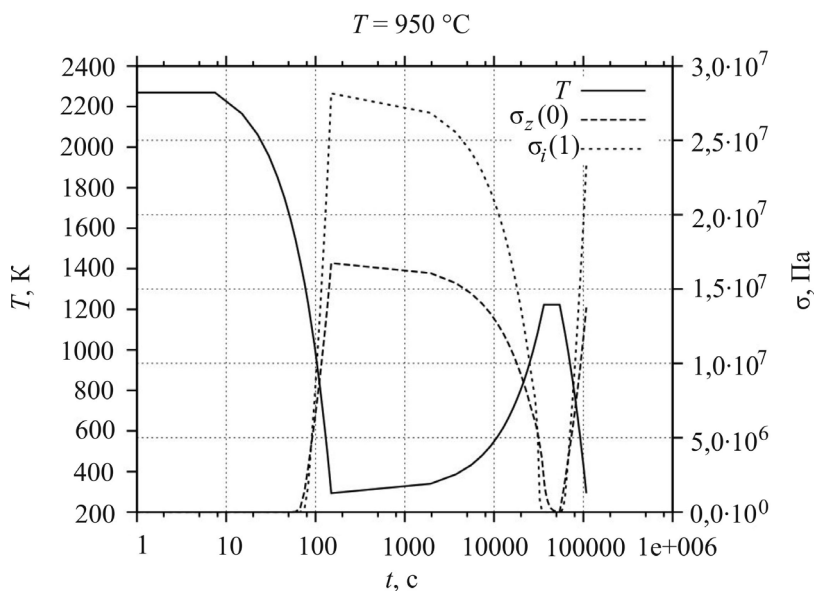


Рис. 8. Эволюция нормального напряжения $\sigma_z(0)$ в центре силового стержня, интенсивности напряжений $\sigma_i(r_0)$ на границе легированной части и чистого кварца в процессе отжига при температуре $950 \text{ }^\circ\text{C}$ при $n = 40$

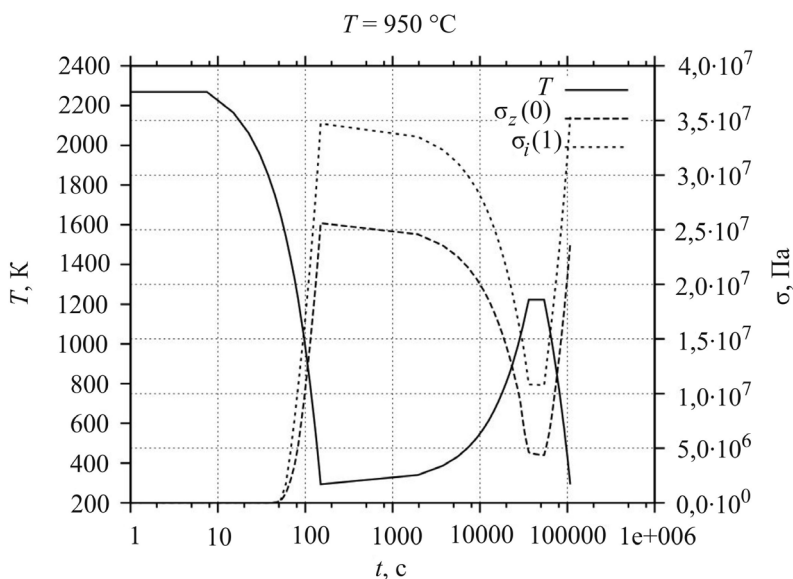


Рис. 9. Эволюция нормального напряжения $\sigma_z(0)$ в центре силового стержня, интенсивности напряжений $\sigma_i(r_0)$ на границе легированной части и чистого кварца в процессе отжига при температуре $950 \text{ }^\circ\text{C}$ при $n = 2$

Таким образом, реализована математическая модель эволюции полей технологических напряжений в цилиндрическом легированном силовом стержне, построенная на основе соотношений линейной термовязкоупругости, в температурных режимах, соответствующих технологическому процессу отжига силового стержня. Установлены количественные характеристики релаксации напряжений в различных условиях протекания процесса отжига. Выявлены режимы, приводящие к максимально возможному снижению опасных растягивающих нормальных напряжений и интенсивности тензора напряжений. Установлено, что для стержней, закон легирования в которых близок к равномерному, процесс отжига является более эффективным, чем для стержней с законами легирования, близкими к параболическому.

Библиографический список

1. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара [и др.]; под ред. Т. Окоси: пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology, Second Edition. – The Royal Society of Chemistry. – Cambridge, 2005. – 291 p.
3. Сметанников О.Ю., Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. Анализ технологических и остаточных напряжений в заготовках комбинированного оптического волокна // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. – Пермь, 2000. – № 1. – С. 35–43.
4. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учеб. пособие / Моск. гос. ун-т леса. – М., 2007. – 222 с.
5. Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
6. 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.
7. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А. Технологические и остаточные напряжения в неоднородном стеклюющемся цилиндрическом стержне // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – № 2. – С. 126–140.

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. – Пермь, 2002. – С. 110–115.

9. Труфанов А.Н., Наймушин И.Г. О модели термомеханического поведения кварцевых стекол и конструкций из них // Вестн. ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – № 3. – С. 85–99.

10. Труфанов Н.А., Сметанников О.Ю., Труфанов А.Н. Модели формирования полей технологических и остаточных напряжений в условиях релаксационного перехода (стеклования) // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород, 2011. – № 4, ч. 5. – С. 2534–2536.

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

References

1. Okosi T., Okamoto K., Ohtsu M., Nishihara H., Kuyma K., Hatate K. Volokonno-opticheskie datchiki [Optical-fiber sensors]. Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 256 p.

2. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology, Second Edition. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2005, 291 p.

3. Smetannikov O.Yu., Trufanov A.N., Trufanov N.A. Analiz tekhnologicheskix i ostatochnyx napryazhenij v zagotovkax kombinirovannogo opticheskogo volokna [Analysis of the technological and residual stresses in preforms of combined optical fiber]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya Mehanika*, 2000, no. 1, pp. 35–43.

4. Burkov V.D., Ivanov G.A. Fiziko-tehnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoy tehniki: ucheb. Posobie [Physical and technological basis of fiber-optic technology: a training manual]. Moscow: *Moskovskiy gosudarstvennyy universitet lesa*, 2007. 222 p.

5. Grodnev I.I., Larin Ju.T., Teumin I.I. Opticheskie kabeli: konstrukcii, harakteristiki, proizvodstvo i primenenie [Optical cables: design, characterization, production and application]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 264 p.

6. 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, pp. 156–161.

7. Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Tehnologicheskie i ostatochnye naprjazhenija v neodnorodnom steklujushhemsja cilindricheskom sterzhne [Technological and residual stresses in an inhomogeneous vitreous cylindrical rod]. *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*, 2009, no. 2, pp. 126-140.

8. Trufanov N.A., Smetannikov O.Yu., Trufanov A.N., Krjukov I.I. Ostatochnye naprjazhenija v zagotovkah silovyh sterzhnej opticheskogo volokna [Residual stresses in the preform of stress applying rods for optical fiber]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tehnologicheskaja mehanika*, 2002, pp. 110-115.

9. Trufanov A.N., Najmushin I.G. O modeli termomechanicheskogo povedenija kvarcevyh stekol i konstrukcij iz nih [The model of the thermomechanical behavior of silica glasses and structures from these glasses]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mehanika*, 2010, no. 3, pp. 85-99.

10. Trufanov N.A., Smetannikov O.Yu., Trufanov A.N. Modeli formirovaniya polej tehnologicheskikh i ostatochnykh naprjazhenij v uslovijah relaksacionnogo perehoda (steklovanija) [Some models of the formation of technological and residual stresses in the relaxation transition (glass transition)]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4, vol. 5, pp. 2534-2536.

11. Mazurin O.V., Streltsina M.V., Svaiko-Shvaikovskaya T.P. Silica glass and binary silicate glasses, Handbook of glass data, physical sciences data, Part A, Elsevier, 1985.

Об авторе

Труфанов Александр Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, директор Областного центра новых информационных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ant@pstu.ru).

About the author

Trufanov Aleksandr Nikolaevich (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: ant@pstu.ru).

Получено 7.02.2013