

На правах рукописи

Семенов Никита Владимирович

**ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АНИЗОТРОПНОГО
ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА «ПАНДА» С УЧЕТОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Труфанов Николай Александрович

Официальные оппоненты: Вахрушев Александр Васильевич, доктор
физико-математических наук, профессор,
ФГБУН «Институт механики Уральского
отделения РАН» (г. Ижевск), заведующий
лабораторией «Механика наноструктур»

Сапожников Сергей Борисович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет) (г. Челябинск), профессор
кафедры «Прикладная механика, динамика
и прочность машин»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет"

Защита состоится 8 октября 2015 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.188.05 при Пермском национальном исследовательском политехническом университете (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, ауд. 345).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Анизотропные кварцевые оптические волокна, сохраняющие направление поляризации светового сигнала, представляют собой оригинальную оптико-механическую систему, в которой принципиальным образом используются известные в механике деформируемых твердых тел эффекты фотоупругости. Для достижения поляризации сигнала в световоде конструктивными и технологическими мерами создается требуемый уровень разности главных остаточных напряжений, определяющий величину двулучепреломления в светопроводящей жиле.

Широкое применение в навигационном приборостроении получили волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), измеряющие абсолютную (относительно инерциального пространства) угловую скорость. Главным чувствительным элементом ВОГ является катушка из кварцевого анизотропного одномодового оптического волокна и от его характеристик зависит качество устройства. Это волокно обеспечивает устойчивую поляризацию световых лучей, высокую оптическую линейность и достаточно малое затухание. Такие волокна характеризуются наличием специальных конструктивных элементов. Так, например, в волокне типа «Панда» эти элементы представляют собой два цилиндрических силовых стержня, легированных различными добавками, влияющими на их механические свойства. За счёт того, что коэффициент линейного расширения (ЛКТР) силовых стержней отличается от ЛКТР окружающего их материала, стержни создают в сечении волокна анизотропию полей напряжений при изменении температуры, что ведет к поляризации светового потока.

Различные проблемы формирования остаточных напряжений в оптоволоконных световодах рассматривали Е.М.Дианов, В.А.Богатырев, М.М.Бубнов, С.Л.Семенов, А.Н.Гурьянов, М.А.Ероньян, З.Э. Арутюнян, О.Ю.Сметанников, Н.А.Труфанов, М. Varnham, R.Guan, Z. Kai, M.Fontaine, М.Н.Aly, S.Siddiqui, A. Zubair и другие. Большинство исследований оперирует представлениями об идеальной геометрической форме волокна, его заготовок и конструктивных элементов. Однако практика показывает, что форма геометрии изделий имеет случайные отклонения и зависит от множества факторов. Технологический процесс изготовления волокна связан со сложным поведением материала при переходе от высоких температур к температурам окружающей среды, при котором 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: неоднородностью температурных полей, несовместностью температурных деформаций неоднородно легированных элементов, терморелаксационными переходами, нарушение геометрии может приводить к существенным различиям между ожидаемым состоянием и реальным.

Поэтому актуальна проблема создания термомеханической модели поведения конструкций из кварцевого стекла с учётом случайной формы геометрии, позволяющей оценивать степень влияния отклонений на напряжённо-деформированное состояние, и, как следствие, на оптические характеристики световода.

Цель работы: разработка и численная реализация математических моделей термовязкоупругости для изучения основных закономерностей формирования полей механических напряжений в кварцевом анизотропном оптическом волокне типа «Панда» и заготовках его конструктивных элементов, с учётом технологических отклонений геометрии формы сечений от проектных значений.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести анализ особенностей технологического процесса изготовления конструктивных элементов оптического волокна типа «Панда», осуществить выбор расчетных схем этапов технологического процесса, определить систему внешних температурных и силовых воздействий, механических характеристик неоднородно легированных кварцевых стекол.

2. На основе обработки массива экспериментально замеренных данных оценить реальную геометрию оптического волокна и его конструктивных элементов с целью выявления закономерностей, диапазонов и характера возможных отклонений, обусловленных несовершенством процесса изготовления, от проектных значений.

3. Построить математические модели формирования технологических напряжений на этапах изготовления заготовки силового стержня анизотропного кварцевого волокна «Панда», высокотемпературного отжига заготовки силового стержня, охлаждения волокна после вытяжки из заготовки.

4. Реализовать разработанные математические модели средствами конечно-элементной среды ANSYS, в том числе с применением вероятностного блока пакета.

5. Провести многопараметрические вычислительные эксперименты для выявления основных закономерностей формирования полей механических напряжений и разработать практические рекомендации.

Методы исследований основаны на использовании методов вычислительной механики деформируемого твердого тела, реализация задач выполнена средствами программной среды конечно-элементного комплекса ANSYS.

Научная новизна:

1. Предложена прикладная модель термовязкоупругости максвелловского типа, описывающая формирование остаточного напряженного состояния в неоднородно легированных трехкомпонентных кварцевых стеклах, в том числе учитывающая вклад в остаточные напряжения пространственно неоднородно распределенного релаксационного перехода.

2. На основе обработки экспериментальных данных впервые установлены законы распределения отклонений параметров геометрии конструктивных элементов оптического волокна типа «Панда» от проектных значений.

3. На основе численного анализа исследованы законы формирования остаточных напряжений в заготовках неоднородно легированных силовых стержней при охлаждении и стравливании наружных слоев. Установлены допустимые с точки зрения прочности законы неоднородного легирования стержня.

4. Получены новые данные о закономерностях релаксации напряженного состояния в силовом стержне в условиях высокотемпературного отжига.

5. Впервые изучено влияние технологических несовершенств геометрии изделий на напряженное состояние и оптико-механические характеристики кварцевого анизотропного световода типа «Панда».

На защиту выносятся:

1. Прикладная модель термовязкоупругости, описывающая формирование остаточного напряженного состояния в неоднородно легированных трехкомпонентных кварцевых стеклах, в том числе учитывающая вклад в остаточные напряжения пространственно неоднородно распределенного релаксационного перехода

2. Данные численного анализа напряженно-деформированного состояния оптического волокна типа «Панда» и его конструктивных элементов на разных стадиях и при разных условиях технологического процесса.

3. Результаты исследования влияния технологических несовершенств геометрии оптического волокна типа «Панда» и его конструктивных элементов на напряженно-деформированное состояние.

Практическая значимость состоит в возможности применения математической модели и ее программной реализации для решения задач отработки параметров технологического процесса и конструкции анизотропных световодов. Диссертационная работа связана с выполнением хозяйственных работ с ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПНППК). Даны рекомендации по выбору законов распределения легирующих добавок по радиусу для силовых стержней. Подобраны оптимальные температурные режимы для процесса отжига. Сформулированы рекомендуемые диапазоны допусков размеров конструктивных элементов и их положения при реализации геометрии заготовок силовых стержней и оптических волокон типа «Панда». Результаты исследования используются в ОАО ПНППК, что подтверждено прилагаемой к диссертации «Справкой об использовании результатов исследования».

Представленные в диссертационной работе исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты №13-08-96036 p_урал_a, 14-08-31530 мол_a).

Достоверность результатов обеспечивается сравнением с известными решениями других авторов, практическим подтверждением сходимости

численных процедур, а также удовлетворительным соответствием данным натуральных экспериментов.

Личный вклад автора заключается в реализации расчетных процедур и проведении численных экспериментов. Постановка задач и анализ результатов моделирования проводились автором совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались, на XX и XXI Всероссийской школе – конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2012 г., 2013 г.), на XVIII и XIX Зимних школах по механике сплошных сред (г. Пермь, 2013 и 2015 г.г.), на II Международной научной конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (г. Пермь, 2013 г.), на V Всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (г. Самара, 2013 г.), на IV-й Всероссийской конференции по волоконной оптике (г. Пермь, 2013), на XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2015 г.), на Всероссийской научной конференции «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» (г. Пермь, 2015). Полностью работа доложена и обсуждена на семинарах кафедры вычислительной математики и механики ПНИПУ (рук. профессор Н.А. Труфанов), Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеев), кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (рук. профессор П.В. Трусов).

Публикации. По теме диссертационной работы имеется 15 публикаций. Из них четыре опубликовано в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК [1,4], и две в журналах, входящих в базу цитирования Scopus [5,6]. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 98 наименований. Общий объем работы – 108 страниц машинописного текста, в том числе 96 страницы основного текста, содержащего 72 иллюстраций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 содержится обзор научных публикаций по моделям формирования напряжённого состояния в стеклюющихся материалах. Проанализированы работы, посвящённые прогнозированию напряжённого состояния в оптическом волокне и его компонентах, в том числе с учётом несовершенств геометрии. На основе анализа научных публикаций, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В главе 2 на основе анализа экспериментальных данных о геометрии кварцевых оптических волокон «Панда» и их конструктивных элементов показано, что при изготовлении не удается получить идеально проектную

форму поперечного сечения стержня. Описан алгоритм статистической обработки геометрических параметров, который позволяет найти подобие в геометрии сечений разных волокон и силовых стержней и выявить характерную форму сечения для всех образцов. Выявлены наиболее вероятные конфигурации реальной геометрии конструкций. Проведено сравнение проектной геометрии волокон и силовых стержней с реальной наблюдаемой геометрией. Сформулированы математические зависимости, которые удобно использовать для решения задач механики кварцевых волокон и их элементов с учётом несовершенств геометрии. Проведено измерение геометрических параметров партии из 150 силовых стержней, произведённых по одной и той же технологии. В результате имеются данные о геометрии наружной границы силового стержня Γ_3 , а также границ между различными оптическими средами Γ_2 и Γ_1 , рис.1.



Рис.1. Схема осевого сечения заготовки силового стержня:
 Γ_1 – граница между внутренним и средним легированными слоями;
 Γ_2 – граница между средним и внешним слоями; Γ_3 – наружная граница заготовки

Существенные отклонения от среднего значения наблюдаются лишь на границе Γ_2 . Разброс значений радиусов $R_{ij}(\varphi_k)$ на этой границе достигает 10% в рамках одного стержня, рис 2, а. При этом математическая обработка данных геометрии показала, что закономерным образом в условиях данного технологического процесса реализуется некруговая форма границы Γ_2 , которую можно условно назвать формой типа «огранка» (с тремя «гранями» разной длины), рис 2, б. Здесь и далее полученные геометрические значения приведены в условных безразмерных единицах, которые определяются как отношение величины к среднему значению по выборке.

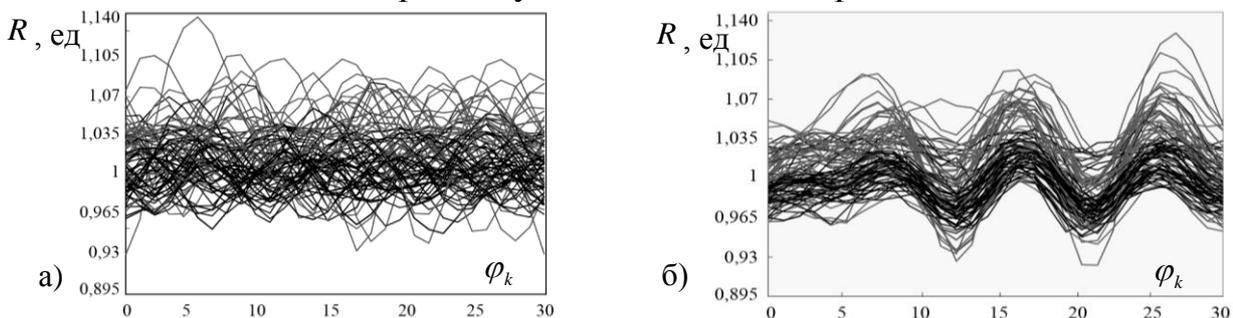


Рис. 2. Зависимости радиусов $R_i(\varphi_k)$ в угловых сечениях $k = \overline{1,30}$ для исследуемых стержней
 (а) до обработки и (б) после обработки.

Статистическая обработка данных представлена на графиках, рис.3. Жирными вертикальными линиями обозначен интерквартильный размах (50% всех значений). Границы тонких линий – это границы статистически значимой

выборки. Посреди жирных линий указаны медианы, соответствующие серединам выборки, а за пределами линий одиночные круги, соответствующие случайным выбросам. Видно, что у заготовок, прошедших технологический контроль (рис. 3, а) размах значений меньше, чем у заготовок, не прошедших контроль (рис. 3, б). Случайных выбросов гораздо больше на графике рис. 3, б. По положению медиан можно судить о симметричности распределения значений в каждом угловом сечении φ_k .

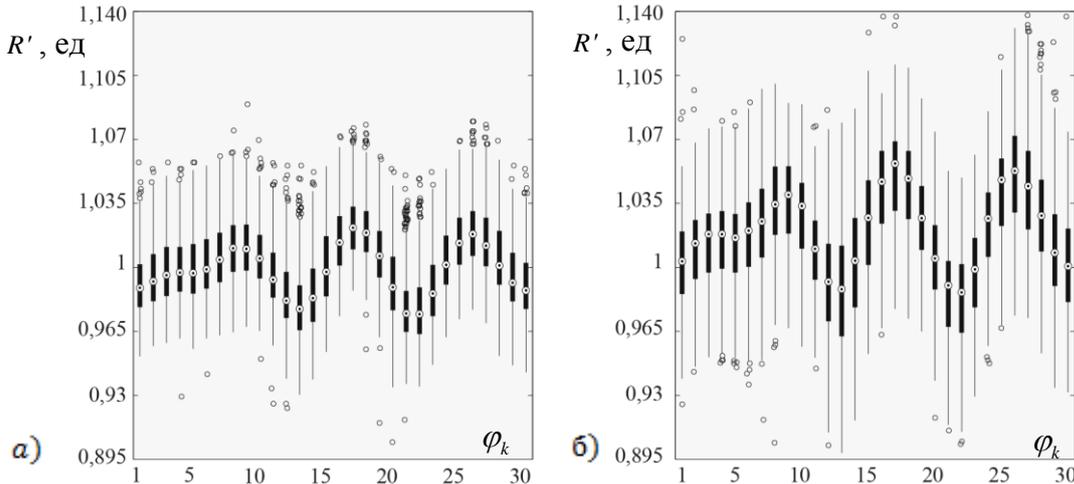


Рис. 3. Распределения вероятностей радиусов $R'_k(\varphi_k)$ в угловых сечениях $k = \overline{1,30}$ для заготовок (а) прошедших и (б) не прошедшие внутренний технологический контроль.

Для аналитического описания полученных конфигураций геометрии использованы зависимости $R'_k(\varphi_k)$ в виде сплайн-аппроксимаций на основе полиномов Эрмита.

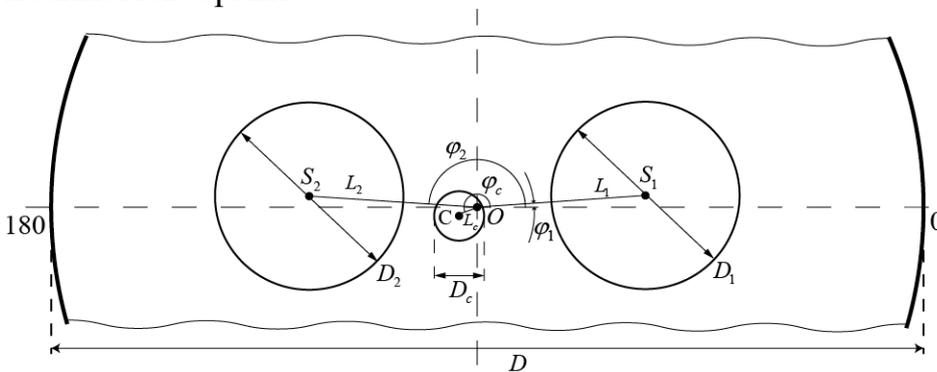


Рис. 4. Схема области сечения оптического волокна типа «Панда», содержащей конструктивные элементы.

Во второй части главы анализируются такие геометрические параметры оптического волокна как: положения центров, диаметры и эллиптичность светопроводящей жилы и силовых стержней (рис. 4). Установлено, что все параметры варьируются в широких диапазонах. При этом характер отклонений относительно друг друга носит случайный порядок, в результате чего невозможно однозначно сказать как тот или иной параметр влияет на общее отклонение геометрии сечения от проектной. Для оценки близости геометрии реального поперечного сечения к проектной геометрии сечения волокна была использована следующая нормированная характеристика (норма):

$\|\Delta\| = \left(\sum_{n=1}^N ((x_n - X_n) / Y_n)^2 \right)^{0,5}$, где x_n, X_n - геометрические параметры реального

волокна и их проектные значения, Y_n - характерный размер. При таком вычислении нормы близость значений к нулю свидетельствует о близости геометрии к проектной, а рост нормы обозначает отклонение тех или иных параметров.

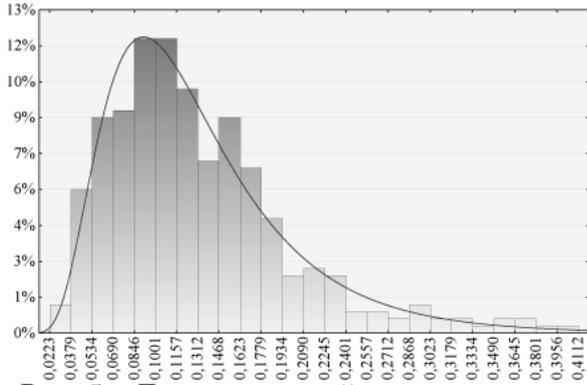


Рис. 5 – Логнормальный закон распределения значения нормы $\|\Delta\|$.

Близость геометрии поперечных сечений волокон в смысле нормы иллюстрирует логнормальное распределение, представленное на рис.5. Наиболее вероятным значением нормы является 0,0923.

На рис.6 представлены два сечения с величиной нормы $\|\Delta\| = 0,37$.

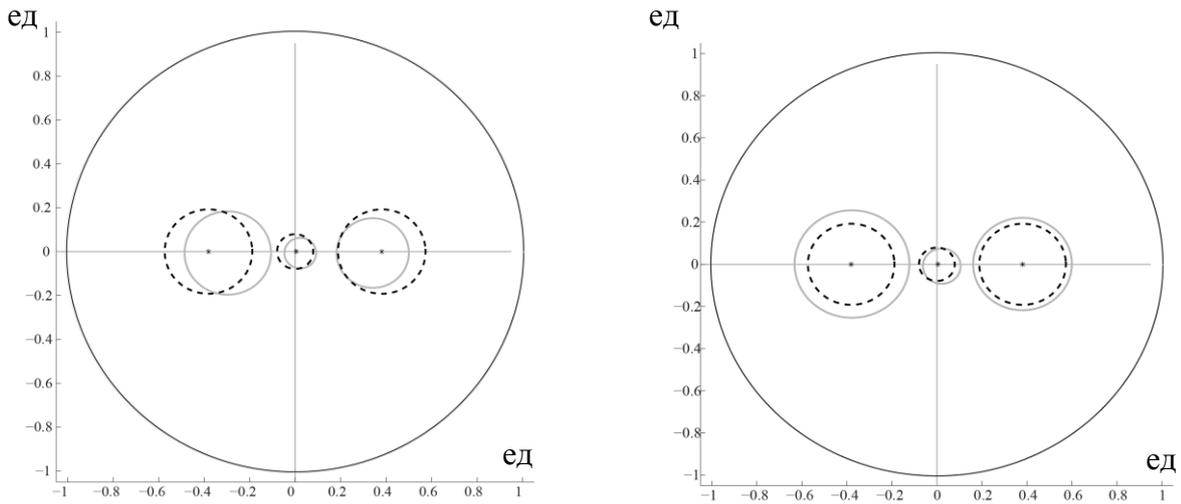


Рис. 6 – Примеры двух конфигураций сечения волокна Панда, значительно отклоняющихся от проектной (пунктир), величина нормы $\|\Delta\| = 0,37$

В главе 3 описана постановка задачи, алгоритм дискретизации и результаты численного анализа прогнозирования полей остаточных напряжений, возникающих в заготовках силовых элементов анизотропного оптического кварцевого волокна типа «Панда» с учётом отклонения формы геометрии от проектной. Для описания термомеханического поведения неоднородно легированных стеклюющихся материалов использованы физические соотношения термовязкоупругости максвелловского типа с вязкостью, зависящей от температуры и степени содержания легирующих элементов. Соотношения в одноосном случае при постоянной вязкости соответствуют уравнениям механической модели Максвелла. На модельных примерах показана возможность описания с помощью выбранных соотношений формирования остаточных напряжений в условиях релаксационного перехода (стеклования) и их релаксации при нагреве до температур размягчения,

зависимости температуры стеклования от скорости изменения температуры и степени легирования.

Принято, что для силовых стержней условия деформирования соответствуют обобщенной плоской деформации (z - ось вдоль заготовки, x, y - в плоскости поперечного сечения) при нулевых усилиях на торцах, для волокна - плоско-деформированному состоянию. Математическая постановка задач, описывающая все этапы изготовления волокна типа «Панда» (охлаждение волокна после вытяжки, охлаждение заготовки силового стержня, травление заготовки силового стержня и высокотемпературный отжиг заготовки силового стержня после охлаждения) включает известные уравнения равновесия, геометрические соотношения теории малых деформаций, граничные условия отсутствия усилий на боковых поверхностях и физические соотношения термовязкоупругости максвелловского типа:

$$\begin{aligned}\sigma_x(x, y, t) &= \left(K + \frac{4}{3}G\right) \left(\varepsilon_x(x, y, t) - \varepsilon_{\theta x}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t)\right) + \\ &+ \left(K - \frac{2}{3}G\right) \left(\varepsilon_y(x, y, t) - \varepsilon_{\theta y}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t) + \varepsilon_z(t) - \varepsilon_{\theta z}(t) - \varepsilon_T(x, y, t)\right); \\ \sigma_y(x, y, t) &= \left(K + \frac{4}{3}G\right) \left(\varepsilon_y(x, y, t) - \varepsilon_{\theta y}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t)\right) + \\ &+ \left(K - \frac{2}{3}G\right) \left(\varepsilon_x(x, y, t) - \varepsilon_{\theta x}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t) + \varepsilon_z(t) - \varepsilon_{\theta z}(t) - \varepsilon_T(x, y, t)\right); \\ \sigma_z(x, y, t) &= \left(K + \frac{4}{3}G\right) \left(\varepsilon_z(t) - \varepsilon_{\theta z}(t) - \varepsilon_T(x, y, t)\right) + \\ &+ \left(K - \frac{2}{3}G\right) \left(\varepsilon_y(x, y, t) - \varepsilon_{\theta y}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t) + \varepsilon_x(x, y, t) - \varepsilon_{\theta x}(x, y, t) - \varepsilon_T(x, y, t)\right) \\ \tau_{xy}(x, y, t) &= 2G \left(\gamma_{xy}(x, y, t) - \gamma_{\theta xy}(x, y, t)\right) \\ \frac{\partial \varepsilon_{\theta x}(x, y, t)}{\partial t} &= \frac{1}{\eta} \left(\sigma_x(x, y, t) - \sigma(x, y, t)\right); \quad \frac{\partial \varepsilon_{\theta y}(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \left(\sigma_y(x, y, t) - \sigma(x, y, t)\right), \\ \frac{\partial \varepsilon_{\theta z}(t)}{\partial t} &= \frac{1}{\eta} \left(\sigma_z(x, y, t) - \sigma(x, y, t)\right); \quad \frac{\partial \gamma_{\theta xy}(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \tau_{xy}(x, y, t)\end{aligned}$$

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

компоненты тензора вязких деформаций $\hat{\varepsilon}_\theta$. $\sigma = \sigma_{kk} / 3$ - среднее напряжение.

Девизор тензора вязкой деформации $\hat{\varepsilon}_\theta(x, y, t) = \hat{\varepsilon}_\theta(x, y, t) - \theta_\theta(x, y, t) \hat{E} / 3$, в силу

того, что в расплавленном состоянии материал предполагается несжимаемой жидкостью ($\theta_B = 0$), равен тензору вязких деформаций $\hat{\varepsilon}_B = \hat{\varepsilon}_B$; $\theta_B = \varepsilon_{Bkk}$ -

объемная деформация. K - модуль объемного сжатия; G - модуль сдвига.

Вследствие неоднородного легирования силовых стержней коэффициент линейного температурного расширения α и вязкость η являются функциями концентраций легирующих элементов $\mu(x, y)$ в точке: $\alpha = \alpha(\mu(x, y))$,

$\eta = \eta_0(\mu(x, y)) e^{A \frac{\mu(x, y)}{T(x, y, t)}}$, где A и η_0 параметры аппроксимации η , зависящие от концентрации. Моделирование распределения концентрации легирующих добавок по радиусу основывается на использовании зависимостей вида:

$\mu(r, \varphi) = \mu_{\max} \left(1 - (r/R'(\varphi))^n \right)$, $r \in [0, R'(\varphi)]$, где μ_{\max} максимальная концентрация легирующей добавки. Для построения геометрии заготовок используются зависимости, полученные во второй главе. Значения в узлах выбираются случайным образом в соответствии с законами распределений геометрических параметров полученных на основе анализа реальных геометрий стержней.

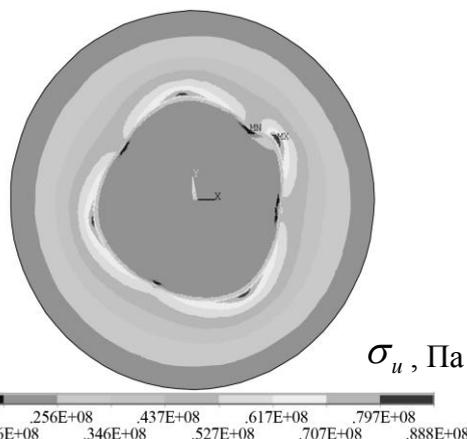


Рис. 7 – Распределение интенсивности напряжения σ_u в плоскости одной из

Численное решение проводится с помощью метода Монте-Карло на основании большого числа (1000) реализаций задачи с разными конфигурациями геометрии. Принято считать, что на прочность заготовки в основном влияет значение интенсивности напряжений σ_u на границе Γ_2 .

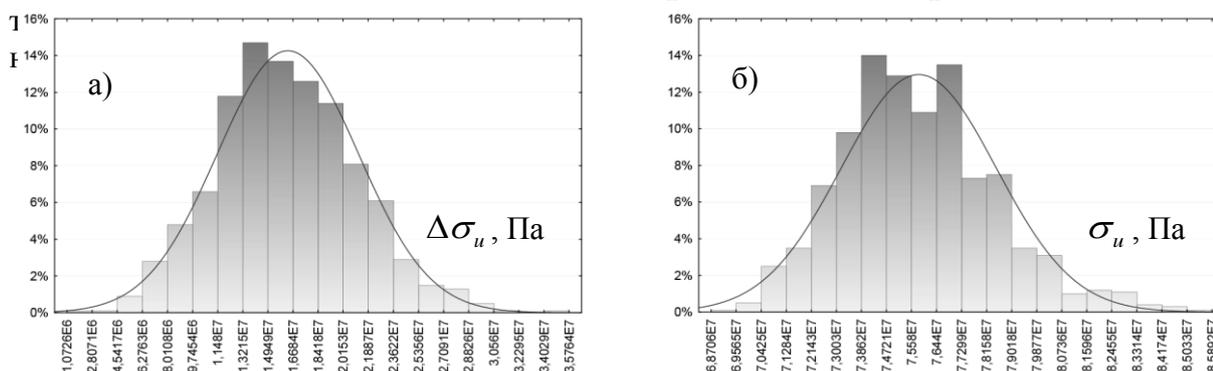


Рис. 8 – Гистограммы распределений интенсивности напряжений на границе Γ_2 для проведённых 1000 численных экспериментов, где а) распределение максимальных разниц между интенсивностями напряжений $\Delta\sigma_u$ в рамках одного стержня, б) распределение максимальных значений интенсивности напряжений σ_u

Интенсивность напряжений на границе может меняться на порядок, что означает наличие областей с возможным резким перепадом напряжений, рис.7-8. Разница между максимальными интенсивностями напряжений $\Delta\sigma_u$ варьируется от 4,5 МПа до 30 МПа. Разброс максимальных значений интенсивности напряжений находится в пределах 22% (~17МПа).

Установлено, что величину максимальной интенсивности напряжений σ_u можно снизить за счёт изменения распределения концентрации легирующих добавок, рис.9. Таким образом, уменьшение

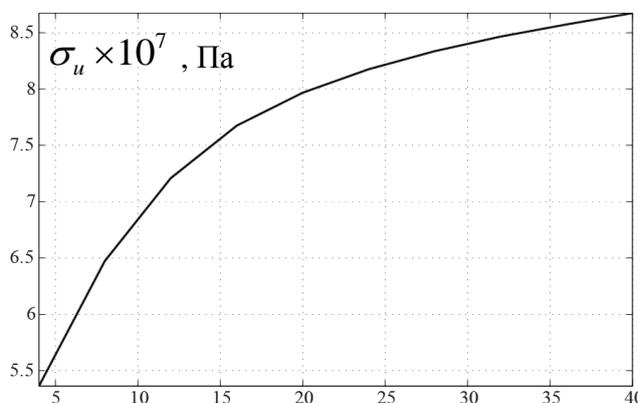


Рис. 9 – Зависимость максимального значения интенсивности напряжений σ_u на границе Γ_2 от коэффициента легирования n .

доли легирующих добавок вблизи границы Γ_2 способствует снижению опасных напряжений (до 40%). Расчёт проводился для формы сечения с самыми большими наблюдаемыми отклонениями.

Во второй части главы решается задача о релаксации остаточных технологических напряжений в силовом стержне при нагреве и выдержке при температурах из диапазона температур стеклования T_a (высокотемпературный отжиг). Обнаружено, что эффективность процедуры отжига существенно снижается при низких значениях показателя n степени в законе легирования. При величинах $n = 20$ и выше отжиг достаточно эффективен, релаксация максимального значения интенсивности напряжений снижается на 16,9% при температуре стеклования $T_a = 1150^\circ\text{C}$ (рис.10).

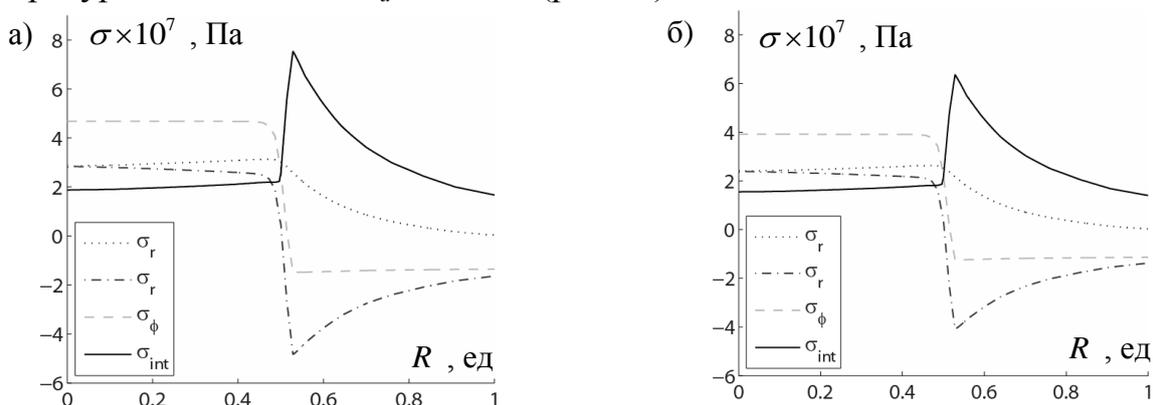


Рисунок 10. Эпюры остаточных напряжений в радиальном сечении силового стержня с максимальными напряжениями а) после охлаждения стержня, б) после процесса высокотемпературного отжига при $T_a = 1150^\circ\text{C}$.

Глава 4 посвящена исследованию закономерностей формирования остаточных технологических напряжений в оптическом волокна типа «Панда» при охлаждении после вытяжки с учетом выявленных ранее несовершенств геометрии формы поперечного сечения.

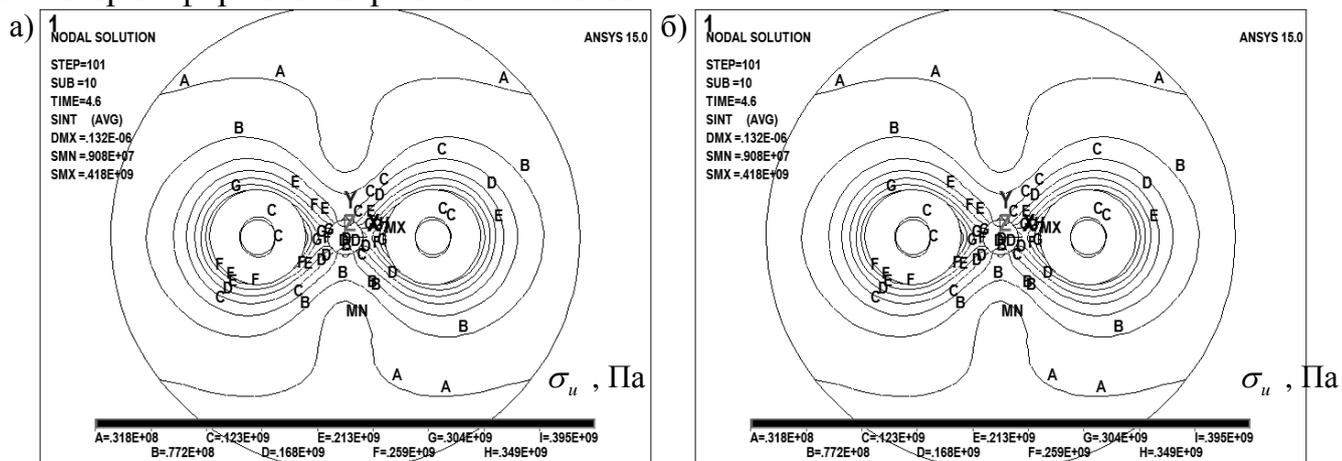


Рис. 11 – Интенсивность напряжений σ_u в волокне - а) проектная форма б) форма с отклонениями.

Выявлено, что наблюдаемые отклонения геометрии не вносят существенный вклад в распределение напряжений на количественном уровне в волокне в целом (разница около 40МПа), рис.11. Однако наблюдается качественное изменение распределения напряжений по сечению, особенно в

области светопроводящей жилы. Такое поведение существенно влияет на одну из ключевых оптических характеристик волокна, а именно на модовое двулучепреломление световода B , которое зависит от разности нормальных напряжений и вычисляется по формуле:

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

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

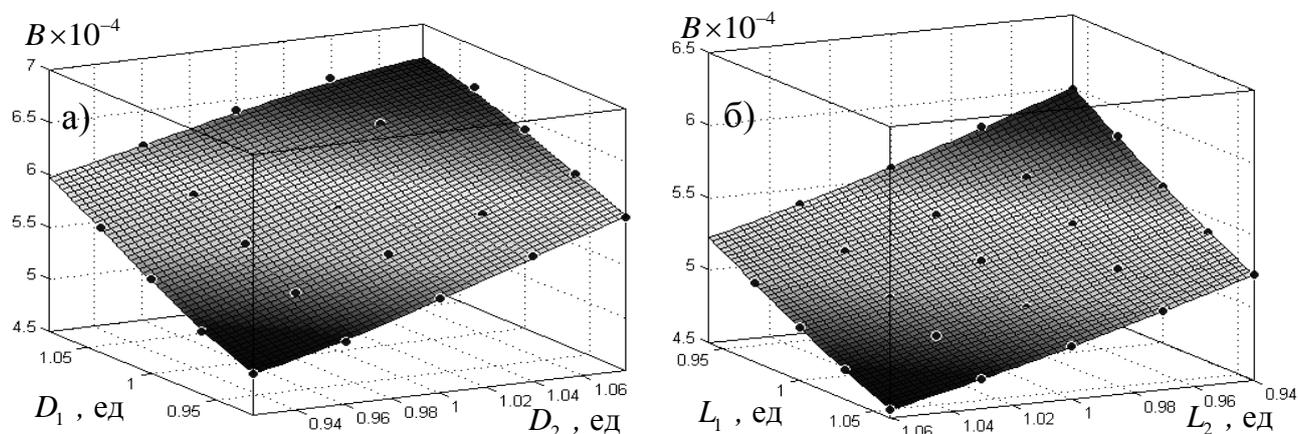


Рис. 12 – Зависимость модового двулучепреломления световода от а) диаметров силовых стержней D_1 и D_2 и б) расстояний от центра волокна до центров стержней L_1 и L_2 .

Определены величины модового двулучепреломления B при установленных наиболее вероятных разбросах диаметров силовых стержней D_1 и D_2 , а также при наиболее вероятных разбросах расстояний от центра волокна до центров стержней L_1 и L_2 , где 1 и 2 – номера стержней. Зависимости $B(D_1, D_2)$ и $B(L_1, L_2)$ представлены графически в виде поверхностей на рис.12.

Установлено, что двулучепреломление коррелирует с эллиптичностью светопроводящей жилы, где эллиптичность $ell = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min})$. На рисунке 13,б показаны зависимости величины двулучепреломления B от величины эллиптичности ell светопроводящей жилы при разной ориентации эллипса. Наблюдается зависимость не только от степени эллиптичности, но и от угла поворота светопроводящей жилы α относительно оси параллельной прямой соединяющей центры силовых стержней, рис 13,а. Максимальное значение двулучепреломления получается в случае максимальной эллиптичности светопроводящей жилы при условии, что $\alpha = 0^\circ$. При таком положении достигается максимальная близость к силовым стержням и наибольшая однородность напряжений. Минимальное значение (меньше на 30%) наблюдается при условии, что большая ось жилы направлена перпендикулярно предыдущему положению.

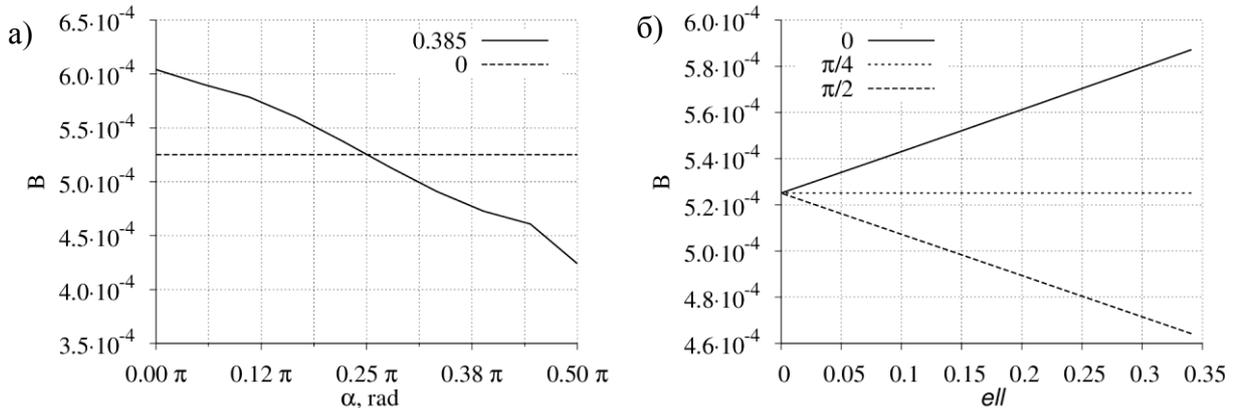


Рис. 13 – Зависимость модового двулучепреломления B а) от угла поворота осей жилы α . б) от эллиптичности ell для трех вариантов угла наклона $\alpha : 0, \pi/4, \pi/2$

Заключение

1. Разработана прикладная модель термовязкоупругости максвелловского типа, описывающая формирование технологических и остаточных напряжений в неоднородно легированных трехкомпонентных кварцевых стеклах, в том числе учитывающая вклад в остаточные напряжения пространственно неоднородно распределенного релаксационного перехода.

2. На основе статистической обработки массива экспериментальных данных о геометрии поперечного сечения оптического волокна и его конструктивных элементов установлены закономерности, диапазоны и характер отклонений параметров геометрии от проектных значений. Показано, что в условиях изученного технологического процесса как наиболее вероятная реализуется некруговая форма поперечного сечения легированного ядра, которую можно условно назвать формой типа «огранка» с тремя «гранями» разной длины.

3. Построена и численно реализована математическая модель формирования технологических напряжений на этапах охлаждения после вытяжки волокна типа "Панда", охлаждения заготовок силовых стержней и релаксации напряжений под действием высокотемпературного отжига заготовки силового стержня.

4. С использованием вероятностного модуля конечно-элементного пакета ANSYS получены статистические распределения полей напряжений с учётом случайных отклонений геометрии. Полученные разбросы разницы напряжений могут достигать 33%.

5. Установлено существенное влияние случайных отклонений формы сечения волокна и его конструктивных элементов на изменение полей напряжений (увеличение максимальной интенсивности напряжений на 22%). Сформулирован ряд мер по нивелированию влияния отклонений формы от проектной на напряжённое состояние, например, за счет изменения закона легирования стержней (возможно снижение максимальных напряжений на величину до 40%).

6. Даны количественные оценки влияния отклонений параметров геометрии сечения волокна на разность главных остаточных напряжений в

светопроводящей жиле, и, как следствие, на двулучепреломление - важнейшую характеристику световода.

7. Результаты диссертационной работы внедрены в ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» в виде методики расчета технологических напряжений в заготовках неоднородно легированных силовых стержней при охлаждении, стравливании наружных слоев и при высокотемпературном отжиге с учетом несовершенств геометрии, а также методики учета влияния отклонений диаметров силовых стержней, расстояний центров силовых стержней от центра светопроводящей жилы, параметров эллиптичности жилы на двулучепреломление световода.

Основные публикации по теме диссертации

1. Семенов Н.В., Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. Задача выбора оптимального закона неоднородного легирования силового стержня для заготовки анизотропного кварцевого волокна типа Панда // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013, т.15, №6(2). – С.484-488. (Журнал входит в Перечень ВАК).

2. 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. (Журнал входит в Перечень ВАК).

3. Праведникова Е.В., Семенов Н.В., Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. Численно-экспериментальное исследование влияния технологических несовершенств геометрии силовых стержней на напряженное состояние и оптические характеристики световода типа “Панда” // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Том 16, № 6. (Журнал входит в Перечень ВАК).

4. Труфанов А.Н., Труфанов Н.А., Семенов Н.В., Стрелкова Н.М. влияние технологических несовершенств формы светопроводящей жилы на напряженное состояние и оптические характеристики оптоволокна типа Panda // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. (Журнал входит в Перечень ВАК).

5. 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, N10. - P.1272-1275. (Журнал входит в международную систему цитирования Scopus).

6. Семенов Н.В., Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. Остаточные напряжения в силовых стержнях для оптического волокна «Панда» с учетом технологических несовершенств формы легированной зоны // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013, №2. - С.133-144. (Журнал входит в международную систему цитирования Scopus).

7. Семенов Н.В., Труфанов Н.А. об оптимальном законе легирования заготовки силового стержня кварцевого оптического волокна // Математическое моделирование в естественных науках: Тез. докл. XX Всеросс. школы-конф. молодых ученых и студентов / Изд-во ПНИПУ, 2012 г. - С. 105-107.

8. Семенов Н.В., Труфанов Н.А. Остаточные напряжения в заготовке силового элемента для анизотропного кварцевого волокна с учетом разброса его геометрических параметров // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 18-22 февраля 2013 г. Тезисы докладов. Пермь-Екатеринбург, 2013. - С.353.

9. Семёнов Н.В., Труфанов Н.А. Остаточные напряжения в заготовке силового элемента для анизотропного кварцевого волокна с учетом технологических несовершенств геометрии легированной зоны // Фотон-экспресс. - 2013, № 6 (110). - С. 163-164.

10. Семенов Н.В., Труфанов Н.А., Труфанов А.Н. Численный анализ влияния процесса отжига на эволюцию полей остаточных напряжений в заготовке силового элемента для анизотропного кварцевого волокна с учетом технологических несовершенств геометрии легированной зоны // Математическое моделирование в естественных науках: Тез. докл. XXI Всеросс. школы-конф. молодых ученых и студентов / Изд-во ПНИПУ, 2013 г. - С. 140-142.

11. Труфанов А.Н., Семенов Н.В. Остаточные напряжения в анизотропном волокне типа panda с учётом технологических несовершенств геометрии // Тез. докл. Всероссийской научной конференции «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» / Изд-во ПНИПУ, 2015 г. - С. 102.

12. Труфанов А.Н., Семенов Н.В., Труфанов Н.А. Численный анализ влияния технологических несовершенств формы анизотропного оптического волокна на поля остаточных напряжений и оптические характеристики // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам / Изд-во МАИ, 2015 г. – С.339-341.

13. Труфанов Н.А., Труфанов А.Н., Семенов Н.В. Влияние технологических несовершенств формы на поля остаточных напряжений в анизотропном оптическом волокне // Тез. докл. XIX Зимней школы по механике сплошных сред / Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015 г. - С.326-327.