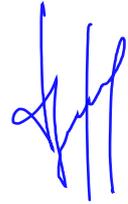


На правах рукописи



Труфанов Александр Николаевич

**ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СПЕЦИАЛЬНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ И
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Пермь – 2024

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный консультант: **Шардаков Игорь Николаевич,**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Аптуков Валерий Нагимович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальной математики, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь;

Ерофеев Владимир Иванович,
доктор физико-математических наук, директор Института проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород;

Федулов Борис Никитович,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории пластичности, ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук,**
г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «02» октября 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.508.01 в Институте прикладной механики Российской Академии наук по адресу: 125040, г. Москва, Ленинградский просп., д. 7, стр. 1, в конференц-зале, кабинет 136.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПРИМ РАН и на сайте <https://iam.ras.ru/trufanov/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.508.01



Корнев Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и разработанность темы исследования. В последние годы значительно расширился спектр применения специальных оптических волокон, что в большей степени связано с развитием волоконно-оптической сенсорики. Уникальные эксплуатационные характеристики и оптические свойства этих изделий непосредственно связаны с термомеханическими процессами при их производстве и эксплуатации. Большой класс специальных оптических волокон составляют световоды, поддерживающие поляризацию введенного сигнала. Эксплуатационные характеристики таких волокон, в первую очередь обусловлены остаточными и технологическими напряжениями, которые в силу известных фотоупругих эффектов, приводят к оптической анизотропии в светопроводящей жиле. Наведение необходимого напряженно-деформированного состояния (НДС) происходит при высокотемпературной вытяжке на заключительном этапе производства такого оптоволокна. Для этого в его конструкцию, вводят напрягающие (или силовые) элементы с высокой степенью легирования оксидами бора, фосфора и других компонентов, которые значительно влияют на физико-механические свойства материала, в частности, увеличивают коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР), снижают температуру стеклования, вязкость и т.д. В результате напряженное состояние анизотропного волокна после вытяжки определяется совокупностью факторов, связанных со свойствами материалов и условиями технологических процессов и обусловлены неоднородностью температурных полей при охлаждении, несовместностью температурных деформаций и релаксационными процессами, протекающими с различной интенсивностью в следствие неоднородного легирования и полей температур.

В процессе вытяжки на оптическое волокно наносят защитно-упрочняющие покрытия (ЗУП) из полимерных материалов. Такие покрытия, призванные в первую очередь обеспечить защиту волокна от внешних силовых воздействий, в условиях эксплуатации могут оказывать существенное влияние на НДС световода и его оптические характеристики, а следовательно, и на точность реализованных на их основе датчиков и приборов. В связи с этим необходимо учитывать, что свойства полимеров существенно зависят от температуры, а в широком эксплуатационном диапазоне температур в ЗУП могут происходить релаксационные переходы, которые существенно влияют на их термомеханические характеристики.

Таким образом, реализующееся в оптическом волокне НДС определяет его ключевые характеристики: с одной стороны, необходимо, чтобы уровень напряжений был как можно выше для обеспечения соответствующих оптических параметров, с другой – не должен приводить к разрушению волокна и заготовок для его производства на всех этапах технологического процесса. ЗУП должно обеспечивать защиту оптоволокна, при этом воздействие его на характеристики конечных изделий должно быть прогнозируемым, чтобы при необходимости учитывать и компенсировать возможное негативное влияние.

Математические модели, описывающие формирование НДС в стеклюющихся материалах в условиях терморелаксационного перехода, представлены в достаточно большом количестве работ: M.L.Williams, Г.М.Бартенева, В.Л.Инденбома, Б.Боли, E.H.Lee, А.А.Ильюшина, В.В.Москвитина, И.И.Бугакова, L.D.Sохон, В.В.Болотина, О.Ю.Сметанникова, Н.А.Труфанова, И.Н.Шардакова, В.П.Матвеевко и др. Известно, что рациональным подходом для описания термомеханического

поведения подобных материалов является использование определяющих соотношений теории вязкоупругости, в которых влияние температуры на деформационный отклик определяется температурными зависимостями времен релаксации. Выбор конкретного вида физических соотношений должен быть феноменологически обоснован, с достаточной точностью описывать наблюдаемые термомеханические эффекты, требовать минимального количества экспериментальных исследований для определения материальных констант, обеспечивать простоту численной реализации.

Анализ литературных источников показал, что в задачах технологической механики оптических волокон реономные модели практически не используются, а наибольшее распространение получили термоупругие постановки с вариациями в выборе температуры начала отсчета термических деформаций. Например, в работах, посвященных моделированию связанных с НДС эффектов в оптических волокнах, в качестве начала отсчета выбраны температуры:

- разогрева заготовки при вытяжке (R.Guan, 2005; M.Ji, 2017, 2019; M.Li, 2019, 2021; H.Yan, 2017; S.A.Siddiqui, 2011);
- стеклования материала волокна (W.Eickhoff, 1982; T.Gong, 2008; D.A.Krohn, 1970; Y.Liu, 1995; K.-H.Tsai, 1991; M.H.Aly, 1998, 2000);
- стеклования легированной зоны (J.Liu, 2020; P.L.Chu, 1984; S.C.Rashleigh, 1983; K.Okamoto, 1981; I.P.Kaminow, 1979, 1981; E.M.Дианов, 1978);
- температура, при которой стекло становится упругим телом (Feng W., 2020);
- фиктивная температура, соответствующая, по A.Q.Tool, появлению упругих свойств¹ (M.Varnham, 1983; V.Bernat, 1992; P.L.Chu, 1982; K.Okamoto, 2022; Wong D., 1991).

Вызывает вопросы обоснованность выбора конкретных значений температуры отсчета деформаций. Так, температура стеклования не является константой и зависит, например, от скорости охлаждения. В ряде работ эта температура не конкретизирована, либо не приводится обоснование сделанного выбора (M.S.Alam, 2010; K.Brugger, 1970; J.-I.Sakai, 1982). В таком случае температура отсчета может выступать в качестве «подгоночного» параметра под экспериментальные данные, а модель не будет способна описывать поведение изделий при иных условиях технологического процесса или эксплуатации.

Применение такого рода склерономных моделей, нечувствительных к режиму охлаждения изделий из стеклюющихся материалов, может быть оправданно только в качестве первого приближения, так как оставляет за рамками рассмотрения важные деформационные механизмы, связанные с релаксационными переходами, которые могут существенным образом влиять на закономерности формирования полей остаточных напряжений.

Следует отметить, что легирование кварцевого стекла в волокне неоднородно и может иметь достаточно сложный профиль, а значит, физико-механические свойства материалов необходимо рассматривать как функциональные зависимости от координат и температуры. Анализ литературных источников показывает, что большинство авторов используют свойства материалов, постоянные в рассматриваемом диапазоне температур, не учитывая, что они могут достаточно

¹ Tool A.Q. Relation between inelastic deformability and thermal expansion of glass in its annealing range // Journal of the American Ceramic society. 1946. № 9 (29). P. 240–253.

сильно от нее зависеть. Практически никогда не учитывается реальный профиль легирования, используются усредненные значения или константы.

Различные виды оптических волокон, сохраняющих поляризацию: bow-tie, elliptical, pseudo-rectangle, elliptical core, panda² и другие (рисунок 1) отличаются геометрией конструктивных элементов, форма которых в большинстве опубликованных работ принимается идеальной, проектной, хотя на практике готовые изделия могут иметь существенные отклонения, обусловленные несовершенством технологического процесса их изготовления. Отклонения геометрических параметров в

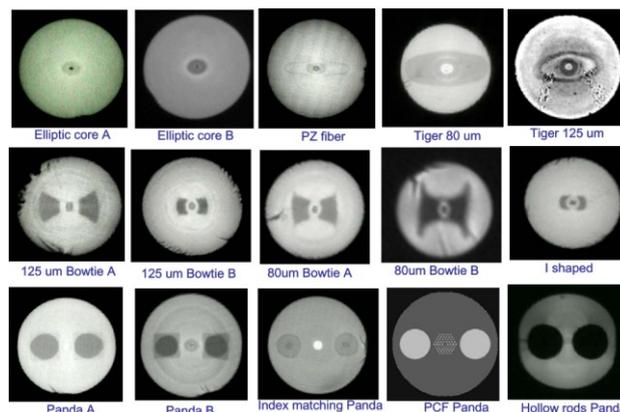


Рисунок 1 – Примеры конструкций анизотропных волокон²

литературных источниках рассматриваются лишь в рамках выбора рациональных вариантов конструкции с вариацией некоторых ее элементов. Неучёт таких отклонений может приводить к значительным погрешностям при определении оптических характеристик специальных оптических волокон и датчиков из них.

На различных этапах производства анизотропного оптического волокна, преформы для его вытяжки и отдельных конструктивных элементов происходит термообработка изделий, в том числе отжиг, который, как известно, снижает уровень остаточных напряжений, что обусловлено активно протекающими релаксационными процессами в материале при температурах, близких к температуре стеклования. Результаты натуральных исследований релаксационных эффектов в стеклах при высоких температурах достаточно широко представлены в литературных источниках, однако, как правило, авторы не связывают эти процессы с реализующимся в волокне напряженно-деформированным состоянием. Модель формирования НДС в оптических волокнах также должна позволять описывать происходящие в них релаксационные процессы, что для наиболее распространенных в литературе термоупругих постановок задача не тривиальная.

Во многих прикладных задачах технологической механики специальных оптических волокон ключевую роль играет полимерное защитно-упрочняющее покрытие. В большинстве представленных в открытой печати исследований ЗУП исключается из рассмотрения, и влияние его на оптическое волокно не учитывается либо рассматривается в термоупругой постановке со свойствами, зависящими от температуры. Такой подход не позволяет адекватно описывать термомеханическое поведение объекта, учитывая, что при эксплуатации в материалах ЗУП могут происходить релаксационные переходы. Использование вязкоупругих моделей в таких задачах позволит более точно описывать наблюдаемые на практике эффекты, однако в открытых источниках в такой постановке исследований не найдено.

Таким образом, представляется актуальной проблема создания модели термомеханического поведения кварцевых стекол, которая позволяла бы учитывать два основных фактора возникновения технологических и остаточных напряжений. Во-первых, несовместность температурных деформаций из-за различия коэффициентов температурного расширения вследствие неоднородности

² Zheng W. Fourier Analysis Method for Asymmetric Polarization-Maintaining Fiber Alignment / W. Zheng, H. Sugawara, B. Malinsky // National Fiber Optic Engineers Conference. – Washington, D.C.: OSA, 2012. – P.1–3.

материалов. Во-вторых, реализацию при охлаждении пространственно-временной неоднородности температурных полей в изделии в условиях протекания процесса стеклования, что ведет к формированию в разных точках сечения различной истории деформирования и появлению внутренних напряжений. Создание такой модели позволяет поставить задачу разработки численных методик прогнозирования напряженного состояния и связанных с ним оптических характеристик анизотропных оптических волокон.

Также актуальной является задача разработки моделей термомеханического поведения в широком температурном диапазоне полимерных покрытий, используемых при производстве специальных оптических волокон, для исследования влияния ЗУП на технологические и остаточные напряжения в анизотропных оптических волокнах в условиях эксплуатации.

Задача построения таких моделей включает оценку прочности отдельных конструктивных элементов, разработку методик и определение функциональных зависимостей физико-механических свойств рассматриваемых материалов.

Построенные модели позволят совершенствовать конструкцию и технологию производства специальных оптических волокон, повышать точность датчиков за счет математического аппарата, интерпретирующего получаемый с сенсоров сигнал с учетом особенностей термомеханического поведения используемых материалов.

Цель диссертационной работы: установление закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в стеклующихся материалах при производстве и эксплуатации анизотропных оптических волокон, для развития подходов к проектированию новых и рационализации существующих оптоволоконных изделий.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ основных этапов производства специального волокна типа «Панда» и для каждого из них определить наиболее значимые термомеханические явления и параметры, влияющие на характер НДС и связанные с ним оптические характеристики изделия.
2. Установить на основе анализа фактической геометрии реальных изделий закономерности распределения геометрических параметров и их отклонений от проектных значений.
3. Построить математические модели на основе определяющих соотношений линейной теории вязкоупругости, позволяющие описывать формирование технологических напряжений в изделиях из стеклующихся материалов на основных этапах процесса изготовления специального волокна типа «Панда».
4. Установить функциональные зависимости физико-механических свойств силикатных стекол и полимеров ЗУП от температуры и концентрации легирующих компонентов. Определить материальные константы и выполнить верификацию физических соотношений.
5. Разработать алгоритмы численной реализации построенных математических моделей и реализовать их в системах инженерных расчетов и конечно-элементного анализа.
6. Выполнить многопараметрический численный анализ с целью установления закономерностей формирования полей остаточных и технологических напряжений и обусловленных ими оптических характеристик световодов.
7. Сформулировать методики исследования изделий из стеклующихся материалов

на ключевых этапах изготовления специального оптического волокна для проектирования новых видов конструкций и совершенствования технологии производства, дать практические рекомендации для рационализации технологии производства волокна типа «Панда».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложены новые прикладные математические модели формирования остаточных и технологических напряжений в неоднородных конструкциях из стеклюющихся материалов на основе определяющих соотношений линейной теории вязкоупругости, позволяющих с достаточной точностью описывать термомеханическое поведение специальных оптических волокон в широком диапазоне температур, включающем релаксационные переходы.
2. На основе анализа фактической геометрии реальных изделий впервые установлены закономерности распределения геометрических параметров и их отклонений от проектных значений для заготовок силовых стержней и поперечного сечения специального оптического волокна «Панда».
3. Методами численного анализа впервые получены закономерности формирования остаточных напряжений в заготовках из неоднородно легированного кварцевого стекла на всех ключевых этапах изготовления специального оптического волокна типа «Панда».
4. Получены новые данные о влиянии наблюдаемых в изделиях отклонений геометрии от проектных значений на эволюцию НДС в заготовках и оптические характеристики готового волокна.
5. Разработана новая методика определения прочностных характеристик на основании натуральных и вычислительных экспериментов и для одного из вариантов конструкции силового стержня впервые определены значения критериальных характеристик конструкционной прочности.
6. Методами натурального эксперимента впервые установлен факт частичной кристаллизации силового стержня при отжиге и роль этого явления в упрочнении изделия.
7. Выполнена постановка задачи оптимизации и впервые определен оптимальный профиль легирования силового стержня, реализующий максимальную температурную деформацию при соблюдении условий прочности.
8. Впервые получены данные о закономерностях влияния защитно-упрочняющих покрытий на оптические характеристики специального оптического волокна типа «Панда» в различных условиях термосилового воздействия.
9. На основании натуральных испытаний впервые установлено, что деформационный отклик полимеров существенно зависит не только от температуры, но и от скорости ее изменения.
10. Сформулирована новая методика натуральных испытаний для определения функциональной зависимости КЛТР пленочных образцов от температуры и скорости ее изменения и для ряда полимеров впервые установлены такие температурные зависимости.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии математических моделей механики сплошных сред с целью учета различных факторов, влияющих на эволюцию НДС в изделиях из стеклюющихся материалов.

Полученные новые экспериментальные результаты деформационного отклика полимеров в зависимости от температуры и скорости её изменения способствуют

более глубокому пониманию механизмов формирования остаточных и технологических напряжений в стеклюющихся материалах, позволяют более точно учитывать и моделировать термомеханические эффекты, связанные с производством и эксплуатацией изделий из них.

Полученные данные о реальной геометрии анизотропных оптических волокон типа «Панда» открывают новые возможности для анализа наблюдаемых эффектов в изделиях из них, которые обусловлены термомеханическими воздействиями при производстве и эксплуатации.

Представленные результаты позволяют уточнить модели интерпретации сигналов с оптоволоконных датчиков с целью повышения их точности.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых феноменологически обоснованных математических моделей, не требующих идентификации большого числа материальных констант, при этом позволяющих адекватно описывать термомеханическое поведение стеклюющихся материалов и с высокой точностью прогнозировать формирование и эволюцию технологических напряжений в процессе изготовления и эксплуатации специальных оптических волокон. Предложенные в работе подходы и методики являются основой для разработки прикладных моделей и алгоритмов их численной реализации, для анализа остаточных, технологических и эксплуатационных напряжений в специальных оптических волокнах и связанных с ними оптических характеристик, в том числе с целью оптимизации эксплуатационных характеристик изделий из них.

Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, разработанные методики идентификации материальных констант, модели и реализованные на их основе алгоритмы и вычислительные программы переданы в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» для практического применения в исследованиях, при проектировании анизотропных оптических волокон типа «Панда», волоконно-оптических датчиков на их основе в целях совершенствования технологии изготовления и развития математических методов интерпретации сигналов оптоволоконных сенсорных систем.

Предложенная и апробированная новая методика определения функциональной зависимости КЛТР от температуры и скорости ее изменения может быть использована как эффективный инструмент для идентификации материальных характеристик любых пленочных образцов.

На основании проведенных исследований:

- сформулированы рекомендации к выбору полимеров ЗУП в рамках реализации программы импортозамещения;
- разработаны методика и алгоритм расчета полей остаточных и технологических напряжений в специальных оптических волокнах и связанных с ними оптических характеристик, позволяющая принимать рациональные конструктивные решения при проектировании изделий;
- разработана методика определения оптимального профиля легирования силовых стержней, и даны рекомендации по организации технологического процесса их изготовления, позволившие значительно снизить брак;
- разработана методика определения рациональных режимов отжига силовых стержней для анизотропного волокна типа «Панда», и даны рекомендации для некоторых вариантов конструкции с учетом профиля легирования.

Методология и методы исследования. Методологической базой

выполняемых в диссертационной работе аналитических, численных и экспериментальных исследований, при построении моделей и определяющих соотношений являются подходы и теоретические разработки отечественных и зарубежных исследователей в области механики деформируемого твердого тела. При постановке и решении краевых задач технологической механики изготовления специальных оптических волокон используются методы теории линейной упругости и вязкоупругости, нестационарной теплопроводности, методы решения систем дифференциальных уравнений, в том числе численные методы конечных элементов и конечных разностей. В задачах оптимизации используется метод Нелдера-Мида. Для обработки данных натуральных экспериментов применяются методы статанализа, а для изучения случайных процессов метод Монте-Карло.

Экспериментальные результаты, представленные в диссертации, получены на современном оборудовании по авторским методикам или в соответствии со стандартными процедурами измерений (ГОСТ, ISO, ASTM). Натурные эксперименты по определению физико-механических свойств полимеров выполнены на динамическом механическом анализаторе (ДМА) TA Instruments DMA Q800 и дифференциальном сканирующем калориметре Q2000 в «Лаборатории пластмасс» ПНИПУ; исследования образцов на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000, сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, синхронном термическом анализаторе Netsch STA449 F1 Jupiter выполнены в ЦКП «Центр наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» ПНИПУ; прочность силовых стержней проводилась на разрывной машине Instron 8801 в ЦКП «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ; геометрия границ легированных зон силовых стержней исследовалась на анализаторе профиля показателя преломления Photon Kinetics PK 2600, а геометрия поперечного сечения волокна «Панда» на измерителе профиля показателя преломления оптоволокна Photon Kinetics S-14 «Института фотоники и оптоэлектронного приборостроения» ПНИПУ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели термо-вязкоупругости, позволяющие описывать формирование остаточного напряженного состояния в изделиях из неоднородно легированных кварцевых стекол и полимеров, с учетом пространственно неоднородно распределенного релаксационного перехода.
2. Данные численного анализа о закономерностях формирования НДС в изделиях из неоднородных стеклующихся материалов на всех ключевых этапах изготовления специального оптического волокна типа «Панда».
3. Результаты анализа зависимостей напряженно-деформированного состояния изделий в процессе производства специального волокна типа «Панда» от отклонений в их геометрии.
4. Математические модели термовязкоупругости, описывающие поведение полимеров защитно-упрочняющего покрытия оптического волокна в условиях релаксационного перехода.
5. Методика определения функциональной зависимости КЛТР от температуры для пленочных образцов.
6. Методика и результаты исследований конструкционной прочности силовых стержней для специального волокна типа «Панда».
7. Методика определения оптимального профиля легирования силовых стержней.

8. Рекомендации по совершенствованию технологического процесса производства анизотропного оптического волокна.

Достоверность и обоснованность результатов измерения физических величин обеспечиваются использованием процедур, соответствующих международным и государственным стандартам, эксперименты выполнены на современном исследовательском оборудовании, а корректность полученных данных подтверждается также воспроизводимостью результатов. Авторские методики верифицированы результатами натуральных экспериментов на образцах с известными характеристиками, а также подтверждаются данными, представленными в открытой печати. Результаты численных расчетов удовлетворительно соответствуют данным натуральных экспериментов и литературных источников.

Личный вклад автора. Представленные в диссертационном исследовании результаты, модели и методики получены лично автором или при непосредственном его участии. Автором выполнен анализ основных этапов технологического процесса изготовления специального волокна типа «Панда», с его непосредственным участием выполнены постановки краевых задач и определены основные факторы, влияющие на характеристики изделия. Непосредственно автором разработана методика определения функциональных зависимостей КЛТР полимеров ЗУП от температуры и скорости ее изменения, а также построены для них определяющие соотношения, выполнена постановка и проведена серия экспериментов, позволившая установить материальные константы и верифицировать модель. Автор принимал непосредственное участие в разработке алгоритмов численной реализации построенных математических моделей; выполнял постановку и принимал участие в реализации натуральных экспериментов; участвовал в обработке, анализе и интерпретации результатов вычислительных и натуральных экспериментов, подготовке статей и докладов по теме диссертационной работы.

Исследования [1, 2] выполнены и подготовлены к печати непосредственно автором. В статье [3] автору принадлежит разработка методики измерений КЛТР, постановка и проведение натуральных экспериментов, обработка и анализ результатов; интерпретация результатов проводилась непосредственно автором при участии соавтора И.Н. Шардакова. В работах [4, 5] автору принадлежат постановка задачи и численная реализация моделей; статистическая обработка отклонений геометрических параметров оптического волокна «Панда» и вычислительные эксперименты выполнены автором совместно с соавтором Н.В. Семеновым, интерпретация результатов и подготовка материалов к публикации выполнена совместно с соавторами. В статьях [6, 7] автор принимал участие в постановке краевых задач, численная реализация и расчеты осуществлялись непосредственно автором при участии соавтора О.Ю. Сметанникова, интерпретация и подготовка статьи выполнены совместно с соавторами. В публикациях [8–10] непосредственно автором осуществлены постановки задач и численная реализация моделей; вычислительные эксперименты выполнены автором при участии соавтора Н.В. Семенова, интерпретация результатов и их подготовка к публикации выполнена совместно с соавторами работ. В статье [11] автором реализована постановка задачи и численная реализация моделей, в том числе осуществлена организация процедуры поиска оптимального профиля легирования методом Нелдера-Мида в виде скрипта APDL для конечно-элементного пакета ANSYS; интерпретация результатов и подготовка материала исследования к публикации выполнены совместно с

соавторами. В исследовании [12] автором разработана программа экспериментов, осуществлялось руководство и принималось непосредственное участие в проведении натуральных испытаний, выполнена постановка краевых задач; численная реализация математической модели, выполнение численных расчетов, обработка, анализ и интерпретация результатов выполнены непосредственно автором при участии соавтора Ю.И. Лесниковой; подготовка материалов статьи к публикации осуществлялась с соавторами. В работе [13] автором выполнена постановка задачи; численная реализация модели и вычислительные эксперименты выполнены непосредственно автором при участии соавтора О.Ю. Сметанникова, интерпретация результатов и подготовка материала для публикации выполнена с соавторами. В исследованиях [14–16] автором выполнены постановки задач, реализованы процедуры идентификации и верификации физических соотношений, анализ и интерпретация результатов выполнены автором совместно с соавтором Ю.И. Лесниковой, материалы для публикации подготовлены совместно с соавторами. В работе [17] автором выполнена постановка задачи, реализованы процедуры идентификации и верификации определяющих соотношений, совместно с соавторами выполнены интерпретация результатов и подготовка материалов статьи. В исследовании [18] автор принимал участие в постановке натуральных экспериментов, совместно с соавторами выполнены анализ и интерпретация результатов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: II Всероссийский семинар «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г.Пермь, 2000 г.); 8-й, 12-й Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г.Пермь, 2001 г., г.Уфа, 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2001» (г.Пермь, 2001 г.); 1-я конференция пользователей программного обеспечения САД-FEM GmbH (г.Москва, 2001 г.); XI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Москва-Истра, 2001 г.); конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (г.Пермь, 2002 г.); 13-я, 19-я, 20-я, 21-я, 22-я Зимняя школа по механике сплошных сред (г.Пермь, 2003, 2015, 2017, 2019, 2021 гг.); 9-я, 11-я, 21-я, 22-я, 25-я, 31-я Всероссийская конференция молодых учёных «Математическое моделирование в естественных науках» (г.Пермь, 2000, 2002, 2012, 2013, 2016, 2022 гг.); 10-й Международный конгресс 10th World Congress on Computational Mechanics (г.Сан Паулу, Бразилия, 2012 г.); 19-я, 20-я, 21-я, 22-я Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС) (г.Алушта, 2015, 2017, 2019, 2021 гг.); Всероссийская научная конференция «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» (г.Пермь, 2015 г.); международная конференция International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016 (г.Томск, 2016 г.); 6-я, 8-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (г.Москва, 2016, 2018 гг.); 12-я Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ2018) (г.Алушта, 2018 г.); Всероссийская конференция молодых ученых-механиков, Y&M-2018, YSM-2021 (г.Сочи, 2018, 2021 гг.); международная научная конференция «Уфимская осенняя математическая

школа – 2021, 2022» (г.Уфа, 2021, 2022 гг.); научный семинар кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики ПНИПУ (г.Пермь, 2022 г., заведующий кафедрой ВММБ – д.т.н., проф. В.Ю. Столбов), научный семинар кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (г.Пермь, 2022 г., заведующий кафедрой – д.ф.-м.н., проф. П.В. Трусов), научный семинар Института механики сплошных сред УрО РАН (г.Пермь, 2022 г., директор – академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеевко).

Связь исследований с научными программами. Исследования по тематике диссертационной работы, проводимые на кафедре ВММБ ПНИПУ с 2000 года в целях развития технологии изготовления специальных оптических волокон, были поддержаны Минобрнауки России в рамках следующих программ и проектов: «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», проект 202 «Создание высокоэффективной технологии изготовления оптических волокон, волоконно-оптических гироскопов и интегрированных навигационных систем нового поколения на их основе» (2001-2002 гг.); грант конкурса 2002 г. индивидуальных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых НОЦ «Неравновесные переходы в сплошных средах» проект № 02-01н-030а «Разработка и реализация в конечно-элементном пакете ANSYS численной модели эволюции технологических напряжений при изготовлении анизотропного кварцевого оптического волокна»; федеральной целевой программы «Интеграция» (2002-2003 г.), проекта № И0573/1343 (УНК «Рифей») «Исследование взаимосвязи эволюции термомеханического поведения полимерных и волокнистых композиционных материалов с процессами фазовых (кристаллизация) и релаксационных (стеклование) переходов»; программ поддержки РФФИ (проекты 07-01-97609; 08-08-12084; 10-01-96032; 13-08-96036; 14-08-31530; 16-48-590660; 20-48-596009), а также финансировались в рамках хоздоговорных научно-исследовательских работ с ПАО ПНППК: договора № 2015/305 «Создание математической модели напряженного состояния волокна при силовых воздействиях и при действии температуры»; № 2017/290 «Исследование свойств акрилатных полимерных покрытий для оптических волокон методом динамомеханического анализа»; № 2018/212 «Определение зависимостей от температуры модуля упругости, модуля механических потерь, тангенса угла механических потерь и КЛТР в пленках из акрилатных, силиконовых и эпоксидных полимеров, используемых в качестве защитно-упрочняющих покрытий для оптических волокон и при намотке волоконных контуров»; № 2019/140, № 2020/388, № 2021/077 «Исследование свойств защитно-упрочняющего покрытия для оптических волокон методами термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии и динамо-механического анализа».

Публикации. По теме диссертационной работы было опубликовано 66 печатных работ, в том числе 18 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень, установленный Минобрнауки России для представления результатов докторских диссертаций, из них 11 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus; получено 2 свидетельства о государственной регистрации ПО для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 377 страницах, содержит 219 рисунков и 27 таблиц, состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованной литературы, содержащего 377 источников.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования, цель работы и содержание представленных подходов, методов и полученных результатов диссертации соответствует актуальному паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, в части п. 1. «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых», п. 2. «Теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой», п. 3. «Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости», п. 10. «Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твёрдых тел», п. 11. «Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях», п. 12. «Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела» и п. 13. «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы диссертационного исследования, представлены положения, выносимые на защиту, описана апробация результатов и информация о структуре работы.

В первой главе изложены основные сведения о специальных оптических волокнах, описаны виды световодов, сохраняющих поляризацию введенного в них сигнала. Рассмотрены особенности технологического процесса изготовления анизотропного волокна типа «Панда». Определены основные задачи технологической механики специальных волокон «Панда», соответствующие ключевым этапам его производства.

Во второй главе рассмотрены особенности термомеханического отклика стеклюющихся материалов, используемых в специальных оптических волокнах.

В п.2.1 приведен обзор моделей термомеханического поведения полимерных материалов и кварцевых стекол в условиях релаксационного перехода, выполнен их анализ, и дана оценка сложности реализации и полноты описания свойств.

В п.2.2 выполнен обзор литературных источников, и обобщена информация по физико-механическим свойствам легированных кварцевых стекол и их зависимостям от температуры и состава. Определена необходимость построения функциональных зависимостей материальных характеристик от температуры и степени легирования. Рассмотрены данные производителей о свойствах полимеров ЗУП, и установлена необходимость в уточнении недостающих данных.

В третьей главе определены основные зависимости физико-механических свойств кварцевых стекол от температуры и концентраций легирующих добавок. Выполнен поиск данных о свойствах легированных кварцевых стекол, используемых в специальных оптических волокнах. Установлено, что представленные в литературе и в специализированных базах данных (SciGlass, Interglad) экспериментальные данные позволяют установить функциональные зависимости вязкости, упругих характеристик и других свойств стекол от температуры и концентрации легирующих добавок. Полученные аналитические

зависимости позволяют реализовать описание термомеханического поведения стекол с помощью определяющих соотношений максвелловского типа с вязкостью, зависящей от температуры и концентрации легирующей добавки μ по закону Аррениуса: $\lg(\eta(T, \mu)) = k_1(\mu) + k_2(\mu)/T$. На основании экспериментальных данных построены аналитические зависимости термомеханических и теплофизических свойств рассматриваемых материалов.

В четвертой главе изложены основные сведения о защитно-упрочняющих покрытиях специальных оптических волокон. Методами натурального эксперимента получены новые данные и уточнена информация литературных источников о материальных характеристиках полимеров ЗУП. Установлено, что в эксплуатационном диапазоне температур от -60 до 60 °С в полимерах ЗУП проходят релаксационные переходы (рисунок 2). Таким образом, для адекватного описания термомеханического поведения таких материалов необходимо использование вязкоупругих физических соотношений и идентификация соответствующих материальных констант методами натурального эксперимента. Результаты четвертой главы представлены в статьях [2, 3, 17] и в других научных работах автора³.

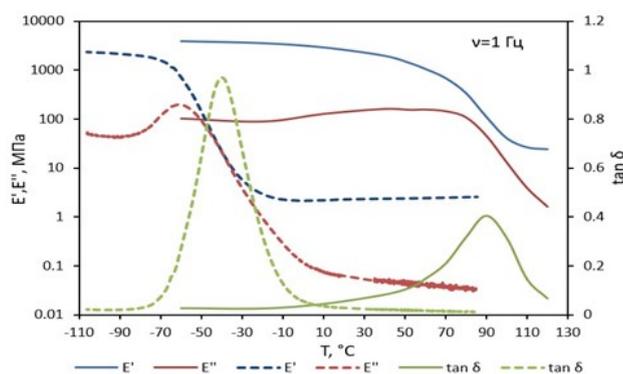


Рисунок 2 – Зависимость комплексного модуля полимеров ЗУП от температуры. (пунктир – внутренний, сплошные – внешний слой)

В п.4.1 описаны особенности пробоподготовки и постановки экспериментов для рассматриваемых полимеров. На основании данных производителя, литературных источников и натуральных испытаний, выполненных на материальной базе «Лаборатории пластмасс» и ЦКП «Центр наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» ПНИПУ, получены данные о свойствах используемых материалов. Установлено, что в ряде полимеров, используемых в оптических приложениях, наблюдаются эффекты физического старения, которые при определенных условиях эксплуатации могут влиять на работу волоконно-оптических датчиков.

В п.4.2 описана новая методика измерения КЛТР пленочных образцов на основании натуральных испытаний на ДМА. Для ряда полимерных материалов получены функциональные зависимости термической деформации (рисунок 3) и КЛТР от температуры и скорости ее изменения. Натурные испытания на пленочных образцах позволили установить, что деформационный отклик полимеров

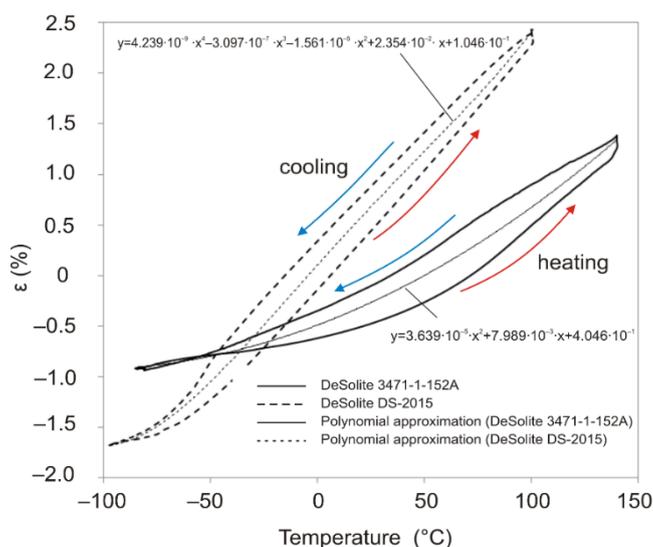


Рисунок 3 – Зависимость деформации от температуры для полимеров ЗУП (пунктир – внутренний, сплошные – внешний слой)

³ Труфанов А.Н. Идентификация определяющих соотношений полимерных материалов в широком температурном диапазоне // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019). 2019. 355–358 с.

зависит не только от температуры, но и от скорости её изменения. Для подтверждения этой гипотезы были выполнены натурные эксперименты по программе, приведенной на рисунке 4. Зависимость деформации от температуры (рисунок 5), демонстрирует, что чем выше абсолютные значения скорости нагрева и охлаждения, тем сильнее разнесены соответствующие им кривые по оси абсцисс. Исследование образцов на DSC подтвердило, что в полимере не наблюдается термодинамических эффектов, связанных с фазовыми переходами.

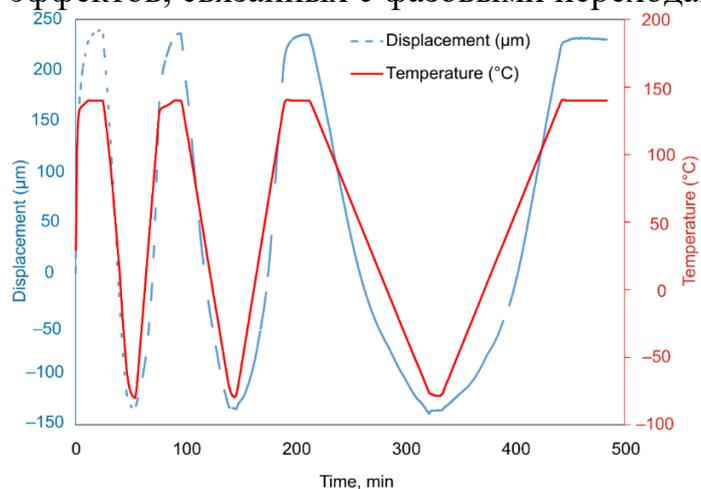


Рисунок 4 – Зависимость перемещений от времени, для образца из внешнего ЗУП толщиной 42 мкм

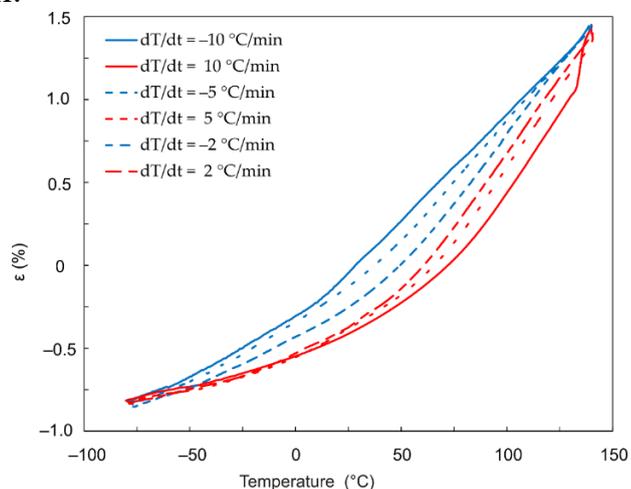


Рисунок 5 – Зависимость деформации образца из внешнего ЗУП от температуры при разных скоростях ее изменения

Разный деформационный отклик на нагрев и охлаждение может приводить к накоплению остаточной деформации в условиях термоцикла. Для проверки этой гипотезы был выполнен эксперимент на цилиндрическом образце по программе, приведенной на рисунке 6. Анализ результатов (рисунок 7) показывает, что на каждом раунде нагрев-охлаждение в образце накапливается остаточная деформация.

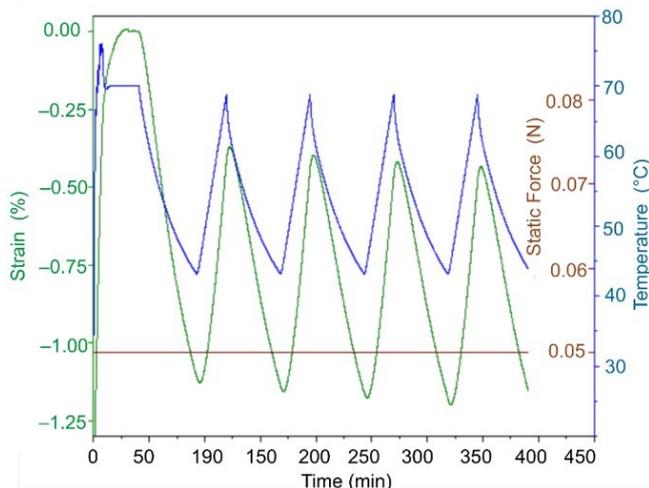


Рисунок 6 – Температурная деформация сжатого цилиндрического образца из первично ЗУП в условиях термоцикла

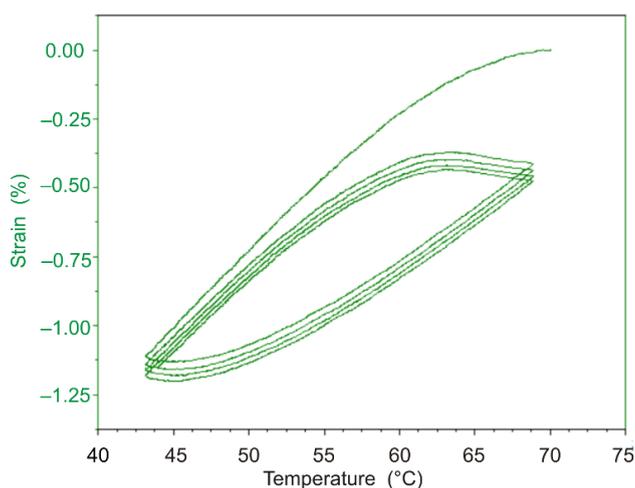


Рисунок 7 – Температурная деформация цилиндрического образца из первично ЗУП в условиях термоцикла

В п.4.3 представлена процедура идентификации материальных констант физических соотношений для полимеров ЗУП на базе натуральных испытаний на ДМА с пленочными образцами при разной температуре и частоте воздействия. Полученные дискретные значения комплексного модуля приведены на рисунке 8. Для аналитического описания термомеханического поведения полимеров ЗУП использовалась линейная вязкоупругая модель (1) с ядром релаксации в виде суммы экспонент (2):

$$\sigma = \int_0^t 2G(t - \tau) \frac{d\epsilon}{d\tau} d\tau + \mathbf{IB}\theta; \quad (1)$$

$$G = G_0 \left[\alpha_\infty^G + \sum_{i=1}^n \alpha_i^G e^{-\frac{t}{\tau_i^G}} \right]. \quad (2)$$

Материалы терморологически простые, поэтому был использован принцип температурно-временной аналогии (3) и функция сдвига Вильямса-Ланделла-Ферри (4). Методом Нелдера-Мида, минимизируя значение квадратичной невязки между расчетными данными и натурным экспериментом, получены решения задач многопараметрической оптимизации, и определены α_i , n , C_1 , C_2 , T_r . Пример полученных таким образом аппроксимаций приведен на рисунке 8, в.

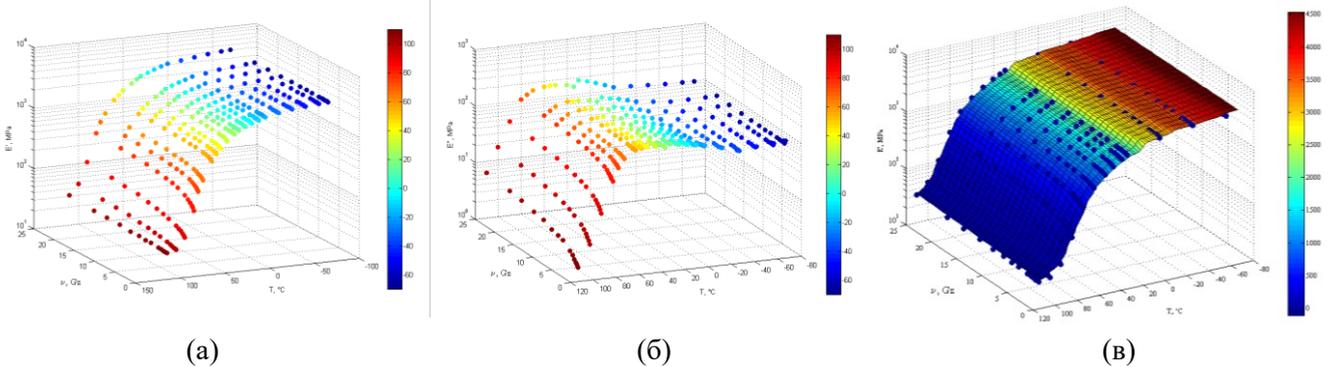


Рисунок 8 – Дискретные зависимости модулей накопления (а) и потерь (б) внешнего ЗУП от температуры и частоты, и аппроксимация данных натурального эксперимента (в)

$$\tau_i(T) = \frac{\tau_i(T_r)}{A(T, T_r)}; \quad (3)$$

$$\log A(T, T_r) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}; \quad (4)$$

$$G' = \alpha_\infty^G + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^G (\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2}; \quad (5)$$

$$G'' = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^G \tau_i^G \omega}{1 + (\tau_i^G \omega)^2}. \quad (6)$$

Для верификации полученных физических соотношений была выполнена серия натуральных экспериментов на ползучесть при постоянной нагрузке и разных значениях температуры. Данные вычислительных и натуральных экспериментов на ползучесть совпадают удовлетворительно, что говорит об адекватности полученных определяющих соотношений (рисунок 9).

В пятой главе представлен анализ математических моделей формирования остаточных напряжений в оптических волокнах. Выполнена постановка, и рассмотрены модельные задачи. Результаты пятой главы опубликованы в работе [6] и в других научных статьях автора^{4,5}.

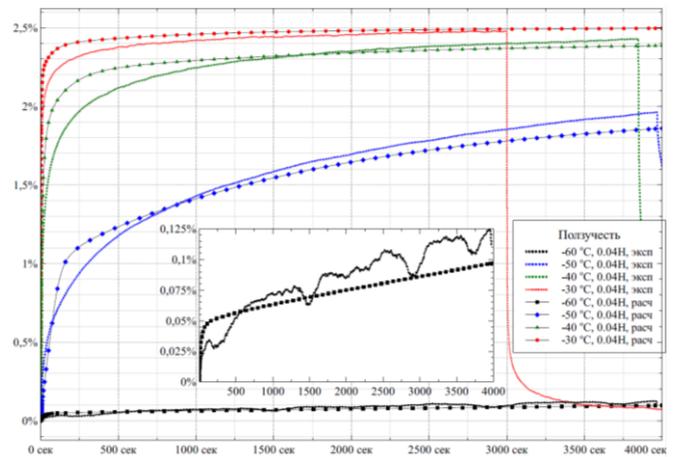


Рисунок 9 – Ползучесть образца из внутреннего ЗУП при разных температурах при постоянной нагрузке (эксперимент – точки, расчет - линии с маркерами)

⁴ Труфанов, А.Н. О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах / А.Н. Труфанов, Н.А. Труфанов // Прикладная фотоника. 2014. Т. 1. № 1. С. 97-111.

⁵ Труфанов, А.Н. О модели термомеханического поведения кварцевых стекол и конструкций из них / А.Н. Труфанов,

В п.5.1 выполнен анализ описанных в литературных источниках подходов к прогнозированию оптических характеристик световодов на основе расчета полей остаточных напряжений. В подавляющем большинстве описанных моделей используются термоупругие соотношения (R.Guan, 2005; M.Ji, 2017, 2019; M.Li, 2019, 2021; H.Yan, 2017; S.A.Siddiqui, 2011; W.Eickhoff, 1982; T.Gong, 2008; D.A.Krohn, 1970; Y.Liu, 1995; K.-H.Tsai, 1991; M.H.Aly, 1998, 2000; J.Liu, 2020; P.L.Chu, 1984; S.C.Rashleigh, 1983; K.Okamoto, 1981; I.P.Kaminow, 1979, 1981; E.M.Дианов, 1978; Feng W., 2020; M. Varnham, 1983; Bernat V., 1992; Chu P.L., 1982; Okamoto K., 2022; Wong D., 1991), что не отражает реальное поведение подобных изделий.

В п.5.2 описана математическая постановка краевых задач технологической механики производства специальных оптических волокон. Принимая во внимание, что практически на всех этапах технологического процесса происходят температурные деформации, а КЛТР кварцевых стекол мал, была принята гипотеза малых деформаций. Известно, что релаксационные переходы не сопровождаются выделением или поглощением тепла, поэтому, учитывая, что внутренних источников тепла нет, диссипативное тепловыделение в виду малости деформаций пренебрежимо мало, – можно разделить краевую задачу нестационарной теплопроводности и краевую задачу термомеханики о НДС, которые в описанных условиях являются несвязанными. Тогда краевую задачу нестационарной теплопроводности с учетом конвективного теплопереноса и излучения по закону Стефана-Больцмана можно записать в следующем виде:

$$\rho(\mathbf{x})c(\mathbf{x},T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\mathbf{x},T)\text{grad}(T)), \quad \mathbf{x} \in V; \quad (7)$$

$$-\lambda(\mathbf{x},T)\text{grad}(T) \cdot \mathbf{n} = h(T) \cdot (T_c - T) + \varepsilon\sigma_0(T_c^4 - T^4), \quad \mathbf{x} \in S; \quad (8)$$

$$T(\mathbf{x},0) = T_0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in V. \quad (9)$$

И соответственно краевую задачу термомеханики:

$$\text{div} \hat{\sigma} = \mathbf{0}, \quad \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad (10)$$

$$\hat{\sigma} = {}^4\hat{C}(\mu(\mathbf{x})) \cdot (\hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}_T - \hat{\varepsilon}_B), \quad \hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x},t) = \hat{E} \int_{T_0}^T \alpha(\mathbf{x},T(\mathbf{x},t)) dT, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \hat{\varepsilon}_B}{\partial t} = \frac{\hat{S}}{\eta(\mathbf{x},T)}, \quad \hat{\varepsilon}_B = \int_0^t \frac{\partial \hat{\varepsilon}_B}{\partial t} dt, \quad \eta(\mathbf{x},T) = \eta_0(\mathbf{x}) e^{\frac{U(\mathbf{x})}{RT(\mathbf{x},t)}}, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (12)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}, \quad \mathbf{x} \in S_u, \quad \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}, \quad \mathbf{x} \in S_\sigma, \quad (13)$$

где ${}^4\hat{C}(\mu(\mathbf{x}))$ – тензор четвертого ранга упругих констант застеклованного материала с учетом зависимости свойств материала от концентрации легирующих элементов $\mu(\mathbf{x})$; $\hat{\varepsilon}_e(\mathbf{x},t) = \hat{\varepsilon}(\mathbf{x},t) - \hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x},t) - \hat{\varepsilon}_B(\mathbf{x},t)$ – тензор упругих деформаций, $\hat{\varepsilon}(\mathbf{x},t)$ – тензор полных деформаций; $\hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x},t)$ – тензор температурных деформаций; $\hat{\varepsilon}_B(\mathbf{x},t)$ – тензор вязких деформаций; $\eta(\mathbf{x},T)$, $\alpha(\mathbf{x},T)$ – вязкость и коэффициент температурного расширения материала, зависящие от температуры и от неоднородно распределенных по объему тела легирующих добавок; T_0 – начальная

температура, при которой предполагается отсутствие в теле начальных напряжений, деформаций и их производных по времени (гипотеза о естественном ненапряженном и недеформированном состоянии); $\hat{S}(\mathbf{x}, t) = \hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) - \sigma(\mathbf{x}, t)\hat{E}$ – девиатор тензора напряжений; $\sigma(\mathbf{x}, t) = 1/3\sigma_{kk}$ – среднее напряжение; \hat{E} – единичный тензор второго ранга; R – универсальная газовая постоянная; $U(\mu(\mathbf{x}))$ – энергия активации. Девиатор тензора вязкой деформации $\hat{\varepsilon}_B(\mathbf{x}, t) = \hat{\varepsilon}_B(\mathbf{x}, t) - 1/3\theta_B(\mathbf{x}, t)\hat{E}$ 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.

В п.5.3 приведен алгоритм численной реализации модели. Для численного решения задачи теплопроводности (7)–(9) использован метод конечных элементов в традиционной реализации. Численное решение задачи термомеханики (10)–(13) производилось пошаговым методом. С этой целью вводилась сетка по времени, что позволяет построить дискретный по времени разностный аналог краевой задачи, где на каждом шаге по времени итерационным методом решается задача термоупругости с уточнением на каждой итерации вязкой деформации, что соответствует неявной схеме отыскания неизвестных на временном слое m :

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}^{m(k)} = \mathbf{0}, \quad \hat{\varepsilon}^{m(k)} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u}^{m(k)} + \left(\nabla \mathbf{u}^{m(k)} \right)^T \right), \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}^{m(k)} = {}^4\hat{C} \cdot \left(\hat{\varepsilon}^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_T^m - \hat{\varepsilon}_B^{m(k)} \right), \quad \frac{\hat{\varepsilon}_B^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_B^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} = \frac{\hat{S}^{m(k-1)}}{\eta(\mathbf{x}, T_m)}, \quad (15)$$

$$\hat{\varepsilon}_T^m = \hat{E} \int_{T_0}^{T_m} \alpha(\mathbf{x}, T) dT, \quad \eta(\mathbf{x}, T_m) = \eta_0 e^{\frac{U}{RT_m}}, \quad \mathbf{x} \in V; \quad (16)$$

$$\mathbf{u}^{m(k)} = \mathbf{U}^m, \quad \mathbf{x} \in S_u, \quad \hat{\sigma}^{m(k)} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}^m, \quad \mathbf{x} \in S_\sigma. \quad (17)$$

Описанный алгоритм (14)–(17) был реализован в пакете ANSYS. Для этого была использована модель Ананд⁶, которая при определенном выборе констант сводится к определяющим соотношениям (11)–(12).

В п.5.4 на модельных задачах рассмотрены основные механизмы формирования, эволюции и релаксации остаточных напряжений в легированных кварцевых стеклах. На рисунке 10 приведены результаты моделирования нагрева заземленных с обеих сторон стержней с разной степенью легирования оксидом бора. Легирующая добавка существенно увеличивает КЛТР стекла, но снижает его вязкость. В численном эксперименте происходил нагрев с постоянной скоростью, затем охлаждение и повторный нагрев образцов. Полученные результаты демонстрируют, что чем выше концентрация оксида, тем больше угол наклона кривой (рисунок 10), и тем больше сжимающие напряжения, что обусловлено большим КЛТР, при этом, чем выше степень легирования, тем раньше происходит релаксация напряжений, что обусловлено снижением вязкости в таких стеклах. На рисунке 11 приведены результаты решения модельной задачи, в которой заземленный с обеих сторон стержень из чистого кварцевого стекла нагревали с

⁶ Brown S.B. An internal variable constitutive model for hot working of metals / S.B.Brown, K.H.Kim, L.Anand // International Journal of Plasticity. 1989. Vol. 5. № 2. P. 95–130.

разными скоростями. Видно, что релаксация напряжений, соответствующая достижению температуры стеклования, зависит от скорости изменения температуры. На рисунках 12–13 приведены результаты модельной задачи об отжиге заземленных стержней из чистого кварцевого стекла и легированного 10% B_2O_3 при температурах 950, 1050, 1150 °C. Анализ результатов показывает, что релаксация напряжений при одинаковых температурах в легированных стержнях происходит существенно быстрее, а также зависит от температуры: чем она выше, тем интенсивнее снижаются напряжения, что соответствует наблюдаемым на практике явлениям.

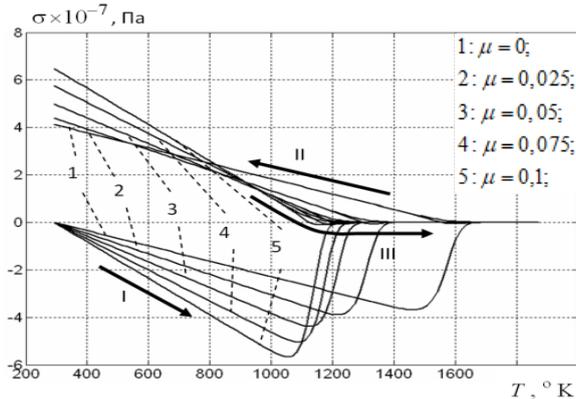


Рисунок 10 – Напряжения в заземлённом стержне при различных концентрациях B_2O_3 . I – нагрев; II – охлаждение; III – повторный нагрев

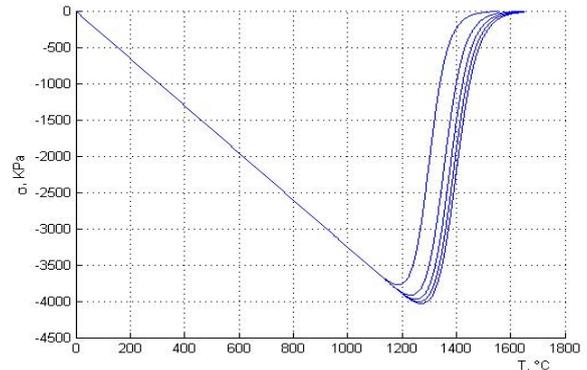


Рисунок 11 – Термомеханические кривые заземленного образца из кварцевого стекла при $\partial T / \partial t = 1 - 20 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{мин}$

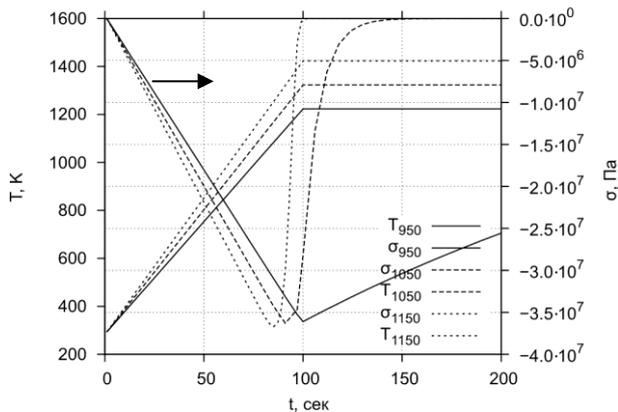


Рисунок 12 – Эволюция напряжений в заземленном стержне из чистого кварцевого стекла в режимах: нагрев - выдержка - охлаждение

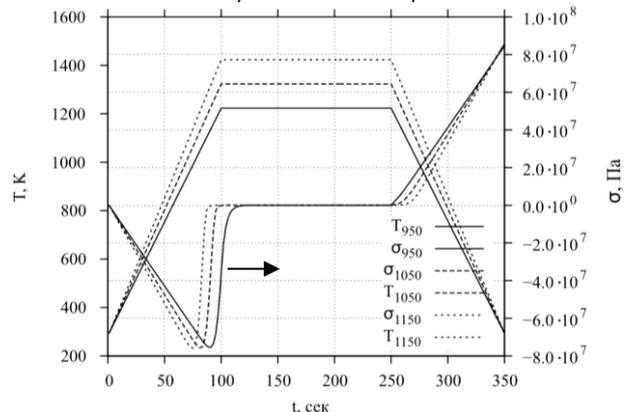


Рисунок 13 – Эволюция напряжений в заземленном стержне из легированного 10% B_2O_3 кварцевого стекла в режимах: нагрев - выдержка - охлаждение

В шестой главе рассмотрены задачи технологической механики, соответствующие этапам производства силового элемента для специального оптического волокна типа «Панда». Результаты шестой главы опубликованы в работах [1, 7–12].

В п.6.1 выполнено численное моделирование эволюции полей технологических напряжений в силовых стержнях. Конструкцию силового стержня (рисунок 14) можно условно разделить на два слоя, при $R_1 < r < R_2$ – чистое кварцевое стекло, при $r < R_1$ – кварцевое стекло, легированное оксидом бора со степенной зависимостью концентрации вида

$$\mu(r) = \mu_{\max} \left(1 - (r/R_1)^n \right). \quad (18)$$

Чем больше параметр n , тем ближе распределение к ступенчатому виду (см. рисунок 14).

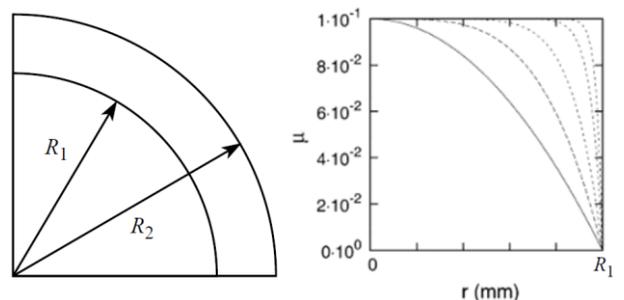


Рисунок 14 – Схема поперечного сечения силового стержня (четверть) и зависимость от радиуса степени легирования

С учетом симметрии, задача об эволюции технологических напряжений решена в осесимметричной постановке. Получено решение задачи нестационарной теплопроводности (рисунок 15), и на основании установленных полей температур решена задача о НДС. На рисунке 16 приведены графики эволюции интенсивности напряжений в центре силового стержня, на границе легированной зоны и на его поверхности. Видно, что в первую очередь происходит стеклование чистого кварцевого стекла и напряжения начинают расти в соответствующих слоях, при дальнейшем охлаждении происходит стеклование легированной зоны, интенсивность релаксационных процессов снижается, что приводит к росту напряжений вслед за снижением температуры.

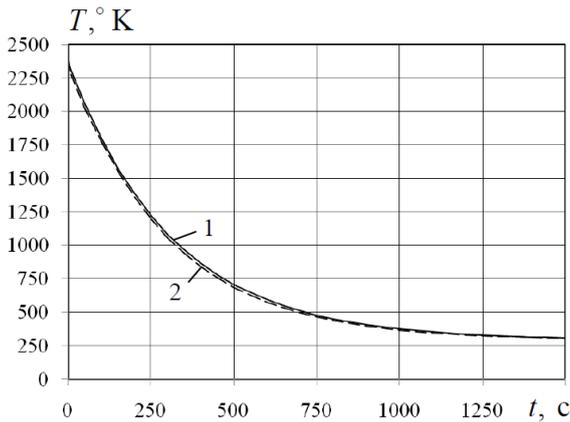


Рисунок 15 – Зависимость температуры силового стержня от времени при его охлаждении после консолидации. 1 – в центре, 2 – на поверхности

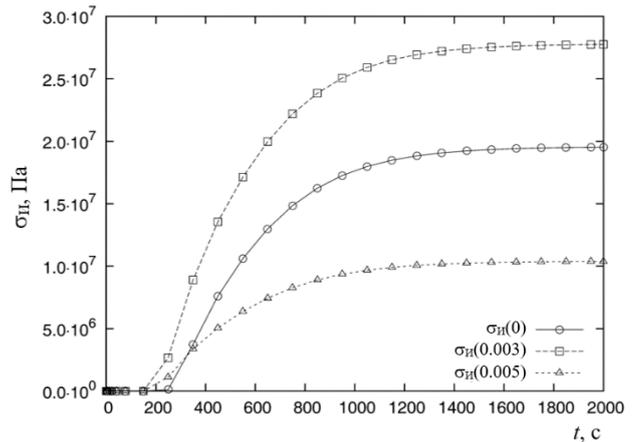


Рисунок 16 – Эволюция интенсивности напряжений в силовом стержне при охлаждении. В центре, на границе легированной зоны и на поверхности ($n=6$)

В п.6.1.1 приведены результаты численного анализа эволюции напряжений в силовых стержнях, легированных оксидом бора. На рисунке 17 представлены эпюры остаточных напряжений в силовом стержне после остывания и стравливания слоев чистого кварцевого стекла для профиля легирования описываемого выражением (18) и значений степенного параметра $n=2$ и $n=20$. Установлено, что с позиций прочности наиболее опасными являются растягивающие напряжения σ_z , максимальные значения которых локализуются в легированной зоне и интенсивность тензора напряжений – на границе чистого и легированного кварцевого стекла. После удаления слоев чистого кварцевого стекла происходит перераспределение и существенное снижение уровня растягивающих напряжений в силовом стержне. Анализ результатов численных экспериментов показал, что с увеличением степенного параметра n уровень максимальных растягивающих напряжений в легированной сердцевине силового стержня снижается, а интенсивность тензора напряжений на границе легирования растет (рисунок 18).

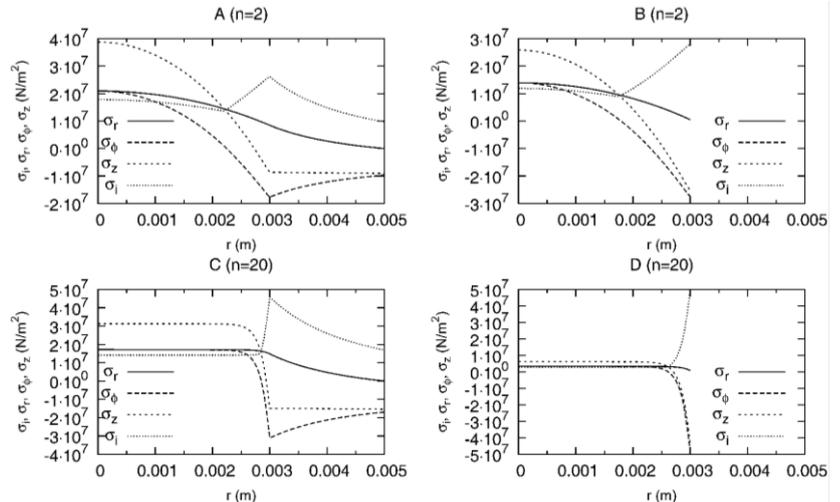


Рисунок 17 – Эпюры остаточных напряжений в силовом стержне, легированном B_2O_3 ($n=2$ – (A, B), $n=20$ – (C, D)) после охлаждения (A, C) и после стравливания слоев чистого кварцевого стекла (B, D)

с позиций прочности наиболее опасными являются растягивающие напряжения σ_z , максимальные значения которых локализуются в легированной зоне и интенсивность тензора напряжений – на границе чистого и легированного кварцевого стекла. После удаления слоев чистого кварцевого стекла происходит перераспределение и существенное снижение уровня растягивающих напряжений в силовом стержне. Анализ результатов численных экспериментов показал, что с увеличением степенного параметра n уровень максимальных растягивающих напряжений в легированной сердцевине силового стержня снижается, а интенсивность тензора напряжений на границе легирования растет (рисунок 18).

В п.6.1.2 рассмотрено влияние одновременного легирования силового стержня оксидами бора и фосфора. Известно, что добавление B_2O_3 снижает показатель преломления кварцевого стекла, а P_2O_5 повышает. В некоторых приложениях необходимо обеспечить повышенный КЛТР силового элемента при сохранении показателя преломления близкого к значениям чистого кварцевого стекла. В рамках численного эксперимента продемонстрировано, что при сохранении легирования на том же уровне, максимальные значения остаточных напряжений возрастают, что в первую очередь связано с большим КЛТР оксида фосфора (рисунок 19). Выполнено также моделирование влияния снижения концентрации оксида фосфора в центре силового стержня после консолидации (рисунок 20). Снижение легирования в центре приводит к незначительному уменьшению уровня остаточных напряжений.

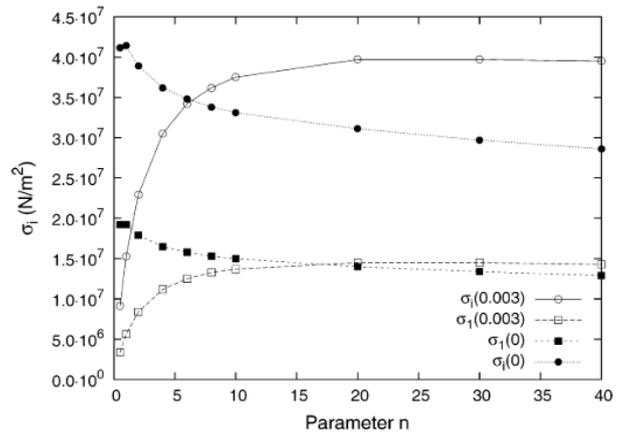


Рисунок 18 – Зависимость σ_1 и σ_n при $r=0, r=0.003$ от степенного параметра n

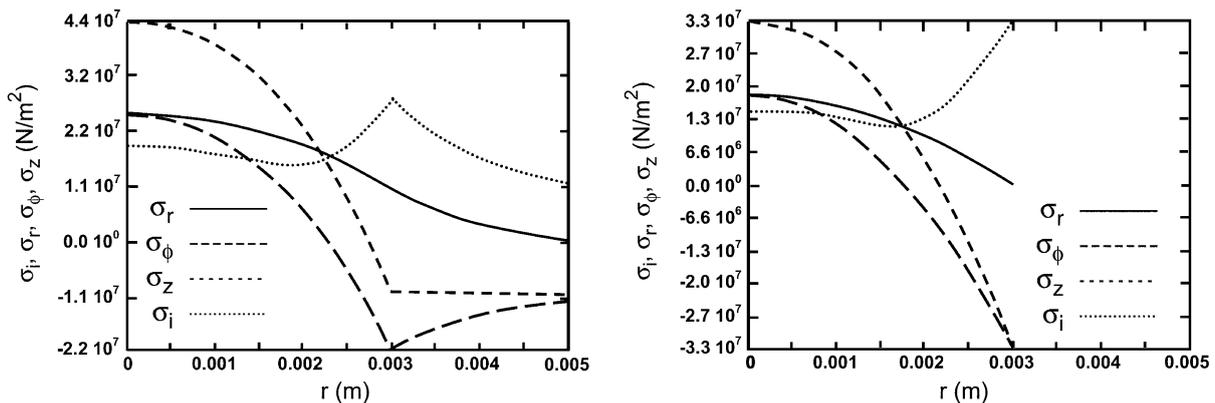


Рисунок 19 – Эпюры остаточных напряжений в силовых стержнях, легированных B_2O_3 и P_2O_5 , $n=2, \mu_{max}=0.1$; после охлаждения (слева); после стравливания (справа).

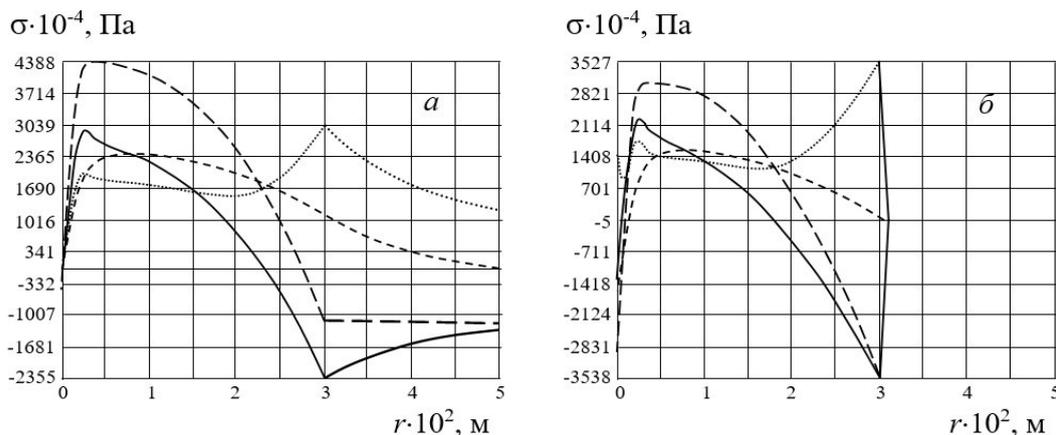


Рисунок 20 – Эпюры остаточных напряжений в заготовке компенсированного силового стержня для случая $n=2$ с учетом падения концентрации в центре силового стержня; а – после охлаждения; б – после стравливания

В п.6.1.3 представлено исследование принципиальной возможности увеличения диаметра силовых стержней с целью изготовления заготовок большего размера для вытяжки оптического волокна типа «Панда». Установлено, что увеличение размера силового стержня приводит к более длительному его охлаждению, и за счет релаксационных процессов уровень остаточных напряжений в силовом стержне большего диаметра оказывается меньше (рисунок 21), чем для

стержня стандартного размера. Показано, что с точки зрения прочности увеличение диаметра силовых стержней допустимо.

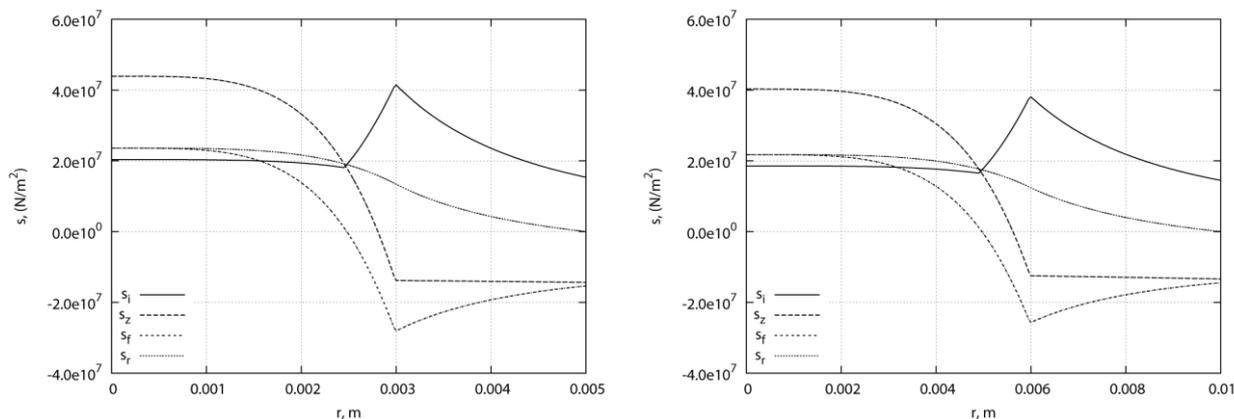


Рисунок 21 – Эпюры остаточных напряжений в силовых стержнях диаметром 1 см и 2 см после охлаждения

В п.6.1.4 представлены результаты численного моделирования отжига силовых стержней. 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. Для рассмотренной конструкции силовых стержней отжиг при температуре 950 °С приводит к снижению нормальных напряжений в легированной сердцевине стержня на 17% и почти на 20% снижает интенсивность напряжений на границе с чистым кварцем (рисунок 22). Дальнейшее увеличение температуры отжига до 1050 °С и 1150 °С практически не приводит к существенному уменьшению напряжений.

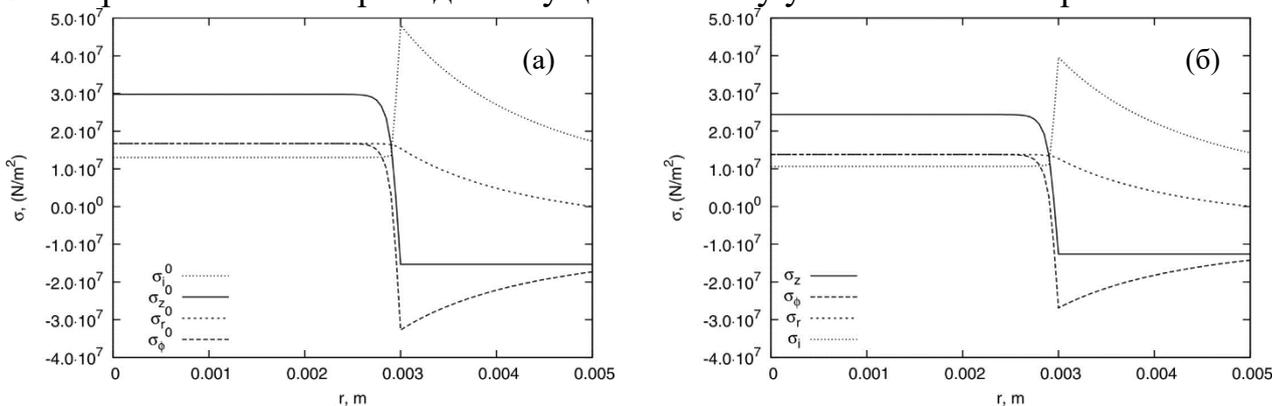


Рисунок 22 – Эпюры остаточных напряжений в силовом стержне после охлаждения (а) и отжига при 950 °С (б)

В п. 6.2 представлено исследование реальной геометрии силовых стержней, а также приведено исследование методами математического моделирования влияния отклонений геометрии на напряженно-деформированное состояние.

С целью определения реальной геометрии исследованы более ста образцов трехслойных силовых стержней (рисунок 23, а) на анализаторе преформ Photon kinetics РК-2600, с помощью которого зафиксированы радиусы границ Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , разделяющих материалы с разным показателем преломления (рисунок 23, б). Установлено, что границы Γ_1 и Γ_3 имеют вариацию доли процента, тогда как граница Γ_2 имеет отклонения от среднего значения до 10%. Результаты измерений до и после

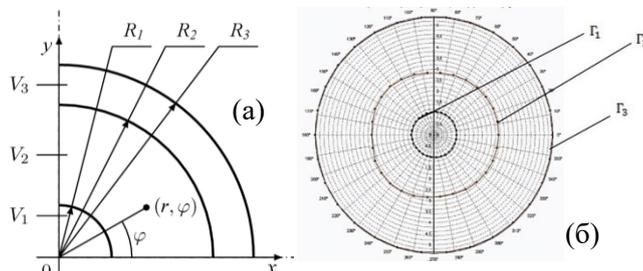


Рисунок 23 – Схема поперечного сечения силового стержня (а), V_1 – $\text{SiO}_2\text{:B}_2\text{O}_3$, V_2 – $\text{SiO}_2\text{:B}_2\text{O}_3\text{:P}_2\text{O}_5$, V_3 – SiO_2 ; диаграмма зависимости радиусов границ Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 от угловой координаты (б)

обработки и сам алгоритм преобразования приведены на рисунке 24. Установлено, что наиболее вероятная геометрия границы легированной зоны Γ_2 в реальных заготовках силовых стержней имеет некруговую форму с тремя криволинейными гранями разной длины. На основании статистической обработки полученных данных с помощью Эрмитовой интерполяции были построены аналитические зависимости, описывающие наиболее вероятный закон изменения $R(\varphi)$ на границе легированной зоны Γ_2 (рисунок 25). Отклонения геометрии легированной зоны от круговой формы могут являться причиной несимметричности полей остаточных напряжений и появления нежелательных концентраторов напряжений, что может отрицательным образом повлиять на прочностные характеристики заготовки.

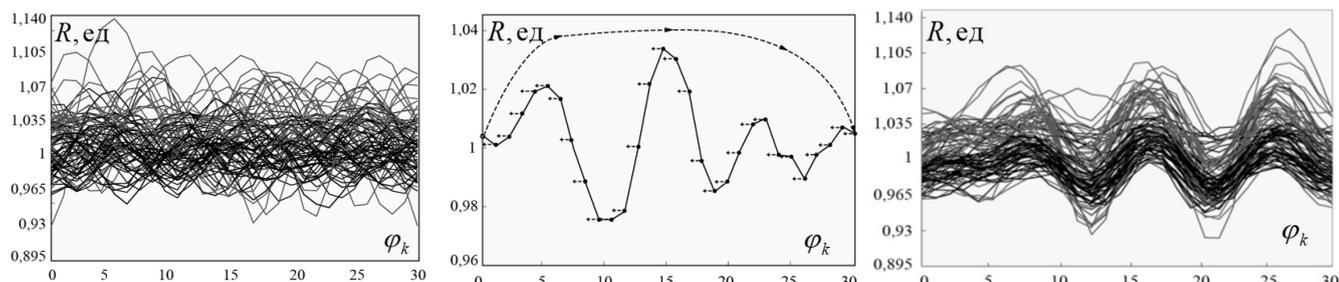


Рисунок 24 – Зависимости радиусов $R(\varphi_k)$ в радиальных сечениях $k=1\dots30$ границы Γ_2 в силовых стержнях. Алгоритм обработки данных (посередине). Данные до обработки (слева) и после обработки (справа)

Для исследования влияния реальной геометрии зоны легирования силового стержня на поля остаточных напряжений был использован метод Монте-Карло. Выполнен расчёт 1000 возможных вариантов геометрии легированной зоны с разными значениями радиусов в узлах аппроксимирующих полиномов (рисунок 25), которые варьировались случайным образом в соответствии с распределениями, полученными из статистического анализа реальной геометрии силовых стержней.

Анализ результатов показал, что отклонение геометрии легированной зоны от проектной формы практически не влияет на максимальные значения растягивающих напряжений σ_z в сердцевине силового стержня, но приводит к существенному изменению значений интенсивности тензора напряжений σ_{II} на границе Γ_2 между чистым кварцевым стеклом и легированной сердцевиной. Максимальные значения σ_{II} описываются нормальным законом распределения, варьируются от $\sigma_{II}=69.2$ МПа до $\sigma_{II}=85.9$ МПа, математическое ожидание составляет $\sigma_{II}=75.8$ МПа, разброс достигает 22% (рисунок 26). Таким образом, максимальное значение интенсивности напряжений на границе зоны легирования в реальных силовых стержнях всегда выше, чем в стержнях с проектной геометрией. Характерное распределение интенсивности тензора напряжений для одного из возможных вариантов сечений приведено на рисунке 27.

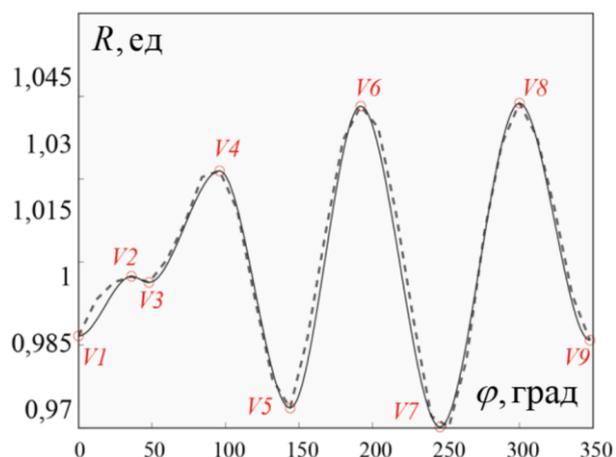


Рисунок 25 – Интерполяция кубическими сплайнами наиболее вероятной зависимости $R(\varphi)$, описывающей границу Γ_2

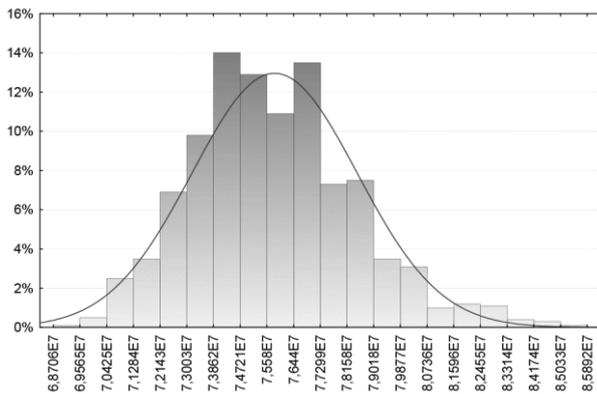


Рисунок 26 – Распределение максимальной интенсивности напряжений на границе Γ_2

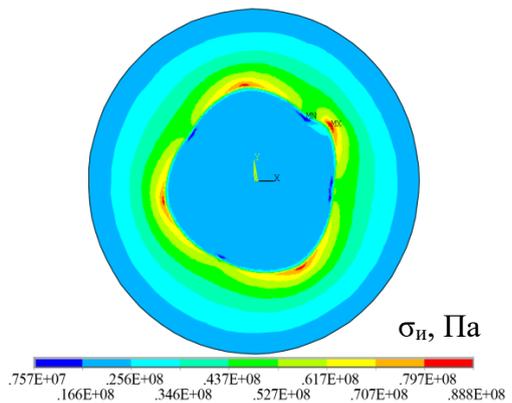


Рисунок 27 – Распределение интенсивности напряжений для одного из типичных сечений

В п. 6.3 рассмотрены вопросы конструкционной прочности силовых стержней. Для повышения двулучепреломления в анизотропных волокнах типа «Панда» используют силовые стержни с высоким уровнем легирования (выше 20%), после консолидации и охлаждения в них формируются поля остаточных напряжений, уровень которых достаточно высок (рисунок 28), что зачастую может приводить к разрушению заготовок (рисунок 29).

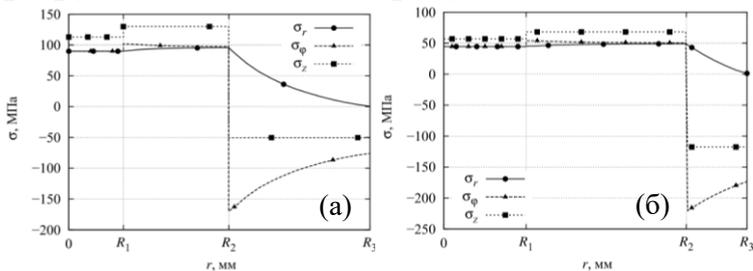


Рисунок 28 – Остаточные напряжения в силовом стержне, после консолидации (а) и после стравливания слоев чистого кварцевого стекла (б)

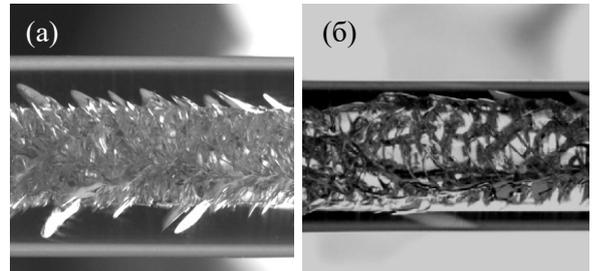


Рисунок 29 – Разрушение легированного ядра силового стержня, после консолидации (а) и после стравливания (б)

С целью определения критериальных характеристик конструкционной прочности были выполнены натурные испытания на разрушение силовых стержней по схеме «трехточечный изгиб» на разных базах, стержнях разной длины и геометрии (рисунки 30 и 31). Для того чтобы определить напряженно-деформированное состояние, соответствующее моменту разрушения стержней, был реализован вычислительный эксперимент, моделирующий натурные испытания (рисунок 32). Расчеты выполнялись в 2 этапа: определение остаточных напряжений в силовых стержнях (см. рисунок 28) по модели (7)–(13) и решение трехмерной задачи линейной теории упругости по схеме, приведенной на рисунке 32. В результате были получены поля напряжений и деформаций (рисунки 33, 34), по которым были определены критериальные характеристики. Установлено, что наименьшей прочностью обладают стержни из чистого кварцевого стекла, примерно вдвое прочнее силовые стержни и еще более высокую

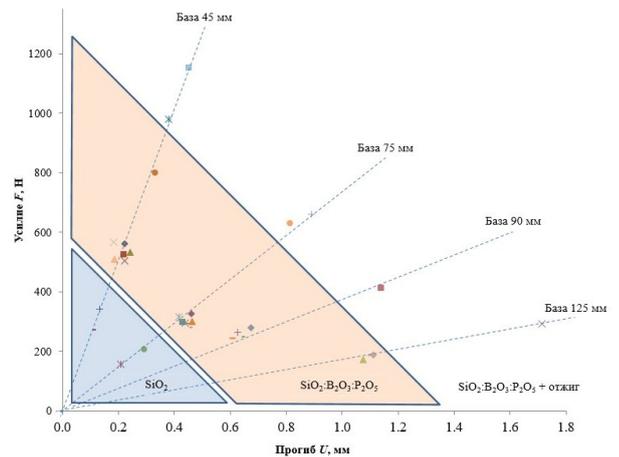


Рисунок 30 – Результаты натурных испытаний на разрушение силовых стержней по схеме «трехточечный изгиб»

прочность показали силовые стержни после термообработки (таблица 1).

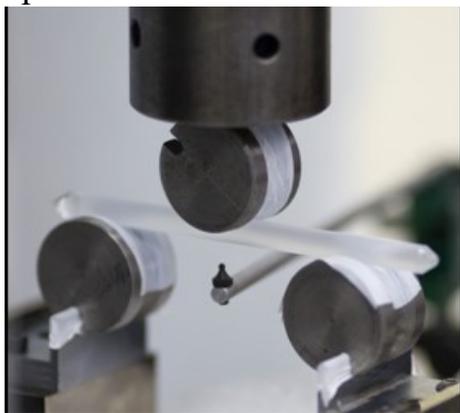


Рисунок 31 – Натурные испытания на разрушение силовых стержней по схеме «трехточечный изгиб»

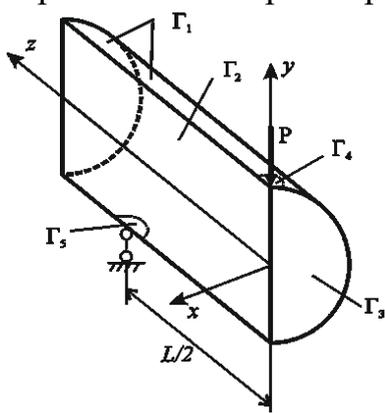


Рисунок 32 – Расчетная схема эксперимента с учетом симметрии конструкции

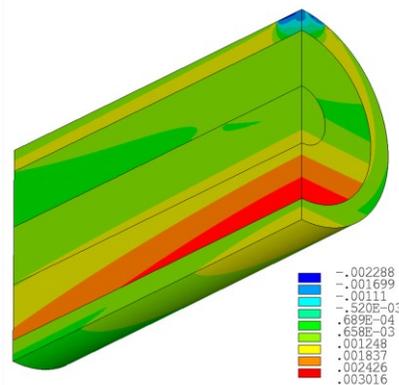


Рисунок 33 – Характерные изополя первой главной деформации, полученные численно

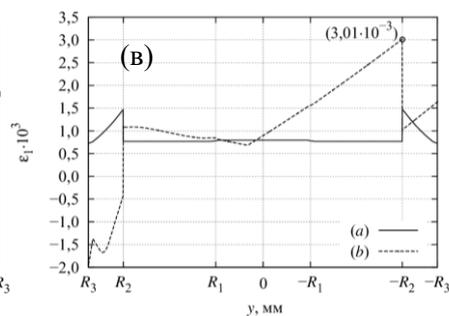
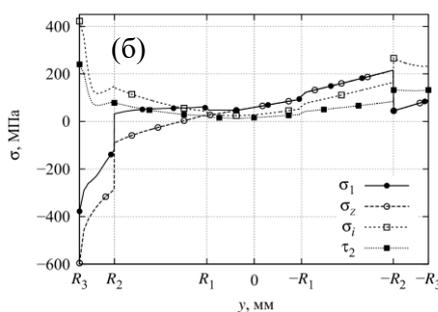
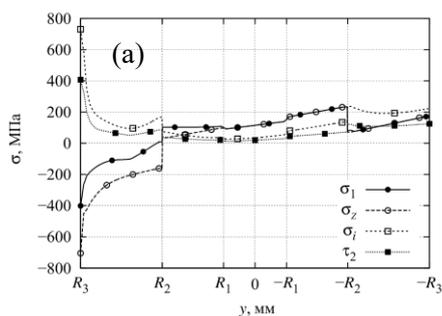


Рисунок 34 – Эпюры напряжений в центральном поперечном сечении в условиях натурных испытаний по схеме «трехточечный изгиб»: в стержне после охлаждения (а), травления (б); эпюры первой главной деформации после травления (в): (а) – остаточная деформация, (б) – в момент разрушения

Таблица 1 – Расчетные значения критериальных величин на момент разрушения

	σ_{1max} , Па	$\sigma_{II max}$, Па	τ_{2max} , Па	ϵ_{1max}	σ_{1max} , Па	$\sigma_{II max}$, Па	τ_{2max} , Па	ϵ_{1max}
Стержни из чистого кварцевого стекла (4 образца)				Силовые стержни (21 образец)				
\bar{X}	9,97E+07	1,83E+08	1,05E+08	1,38E-03	2,06E+08	3,11E+08	1,68E+08	2,85E-03
\bar{d}	1,40E+07	3,60E+07	2,08E+07	1,94E-04	7,81E+06	7,11E+07	4,57E+07	1,06E-04
m	14,00%	19,90%	19,84%	14,00%	3,79%	20,44%	14,25%	3,73%
Упрочненные силовые стержни (6 образцов)								
\bar{X}	3,19E+08	4,02E+08	2,58E+08	4,60E-03	\bar{X} – среднее значение, \bar{d} – размах вариации, m – линейный коэффициент вариации.			
\bar{d}	3,46E+07	1,60E+08	7,35E+07	5,31E-04				
m	10,85%	39,86%	28,46%	11,55%				

Исходя из полученных результатов, для оценки прочности силовых стержней был выбран критерий максимальных главных деформаций. Установлено, что разрушение силовых стержней происходит с формирования магистральной трещины с границы чистого кварцевого стекла и легированной зоны.

В п.6.4 рассмотрены вопросы повышенной прочности отожженных силовых стержней. Моделирование отжига силовых стержней показало снижение максимальных значений первых главных напряжений на 15–20%, что не позволяет объяснить упрочнение силового стержня на 60%. Натурные эксперименты на ДСК показали, что в материале отожженных силовых стержней происходят фазовые переходы (рисунок 35).

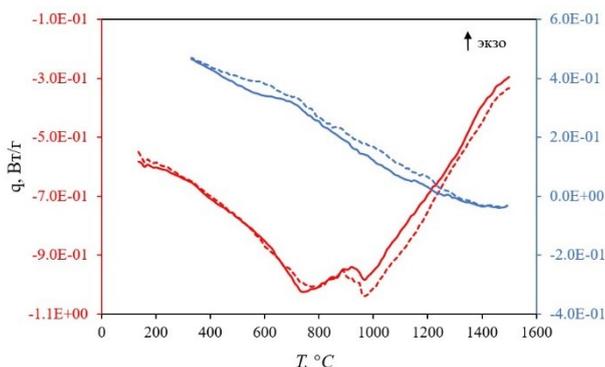


Рисунок 35 - Результаты ДСК-анализа фрагментов силовых стержней. Нагрев – красным цветом, охлаждение – синим

Также на рентгенограммах образца из фрагмента силового стержня нет ярко выраженных пиков, что свидетельствует об отсутствии кристаллической фазы в существенном объеме. Однако при помощи программного обеспечения «Dxra Version 7.00» была определена степень кристалличности 4.33%. Исследования на электронном микроскопе показали наличие кристаллитов на поверхности фрагментов легированной зоны силовых стержней (рисунок 36). В литературных источниках^{7,8} описаны случаи кристаллизации кварцевого стекла в форме кристобалита в близких по составу стеклах при температурах отжига в районе 900 °С. Известно, что частичная кристаллизация существенно увеличивает КЛТР кварцевого стекла⁷, а также при небольшой степени кристалличности значительно увеличивает его прочность^{9,10}. В результате установлено, что в отожженных силовых стержнях наблюдается частичная кристаллизация сердцевин в районе границы между зоной легирования и чистым кварцевым стеклом, за счет чего и увеличивается прочность всей конструкции.

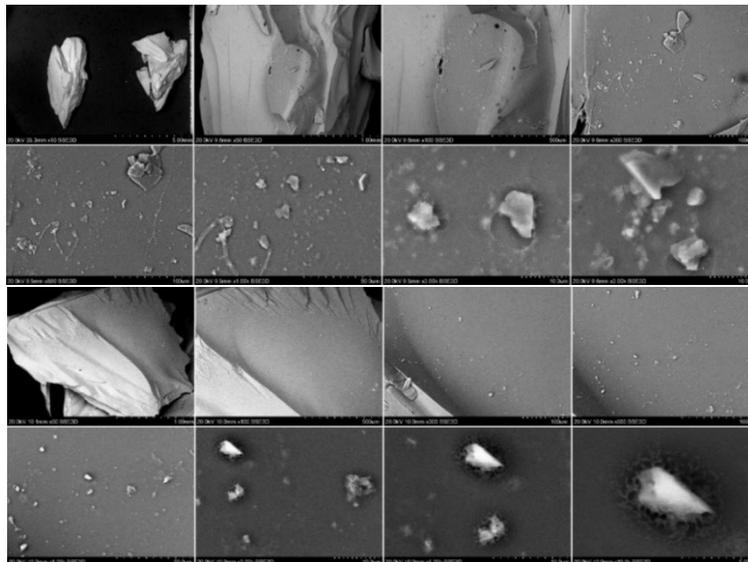


Рисунок 36 – Микрофотографии фрагментов отожжённого силового стержня

В п.6.5 представлены результаты решения задачи о выборе оптимального закона легирования силовых стержней. В качестве целевой функции, характеризующей величину температурной деформации, используется интегральное относительное содержание оксида бора в элементе стержня единичной длины $\Phi(p_1, \dots, p_k) = 2\pi \int_0^{r_1} \mu(p_1, \dots, p_k, r) r dr$, где параметры оптимизации p_1, \dots, p_k являются коэффициенты функции $\mu(r)$, описывающей закон распределения легирующего оксида B_2O_3 . Задача оптимизации была сформулирована следующим образом: найти параметры распределения, обеспечивающие максимальное значение функции $\Phi(p_i)$ (обеспечивающей максимальную температурную деформацию силового элемента) при ограничениях типа неравенств (условия прочности $\sigma_1(p_1, \dots, p_k) < [\sigma_p]$, $\sigma_n(p_1, \dots, p_k) < [\sigma_c]$) и ограничения типа равенств (уравнения краевой задачи по определению остаточных напряжений при изготовлении стержня с законом легирования $\mu(r)$). Для преобразования сформулированной задачи с ограничениями типа неравенств и равенств к задаче минимизации без ограничений типа неравенств использован метод штрафных функций, что позволило записать целевую функцию в следующем виде:

⁷ Jean J.-H. Crystallization kinetics of binary borosilicate glass composite / J.-H.Jean, T.K.Gupta // Journal of Materials Research. 1992. Vol. 7, № 11. P. 3103–3111.

⁸ Breneman R.C. Kinetics of cristobalite formation in sintered silica / R.C.Breneman, J.W.Halloran // Journal of the American Ceramic Society. 2014. Vol. 97, № 7. P. 2272–2278.

⁹ Breneman R.C. Effect of cristobalite on the strength of sintered fused silica above and below the cristobalite transformation / Breneman R.C., Halloran J.W. // Journal of the American Ceramic Society. 2015. Vol. 98, № 5. P. 1611–1617.

¹⁰ Fleming J.D. Fused silica manual / J.D. Fleming – Georgia Institute of Technology, 1958. 437p.

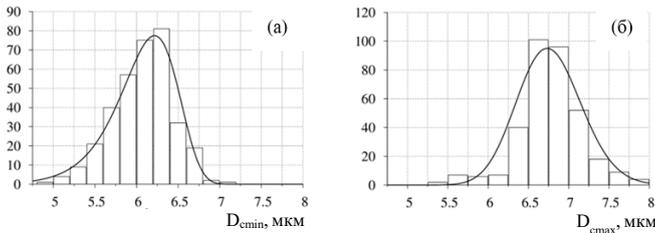


Рисунок 40 – Гистограммы геометрических параметров светопроводящей жилы - форма эллипса (а) малая ось D_{\min} ; (б) большая ось D_{\max}

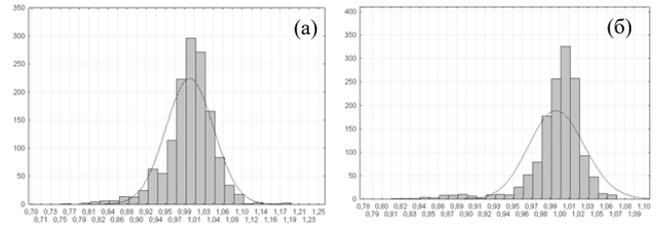


Рисунок 41 – Гистограммы геометрических параметров волокна. (а) диаметр силового стержня D' ; (б) расстояние L'

деформированное состояние и связанные с ним оптические характеристики. Получены закономерности (рисунок 42), описывающие зависимость от геометрических параметров волокна модового двулучепреломления, которое с найденными полями напряжений связано следующим соотношением

$$B = C(\lambda) \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} (\sigma_x(r, \varphi) - \sigma_y(r, \varphi)) |E(r, \varphi, V)|^2 r dr d\varphi \times \left(\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} |E(r, \varphi, V)|^2 r dr d\varphi \right)^{-1}, \quad (19)$$

где σ_x и σ_y – нормальные напряжения в поперечном сечении волокна; $C(\lambda)$ – фотоупругая постоянная для данной длины волны; $E(r, \varphi, V)$ – распределение интенсивности основной моды по поперечному сечению световода.

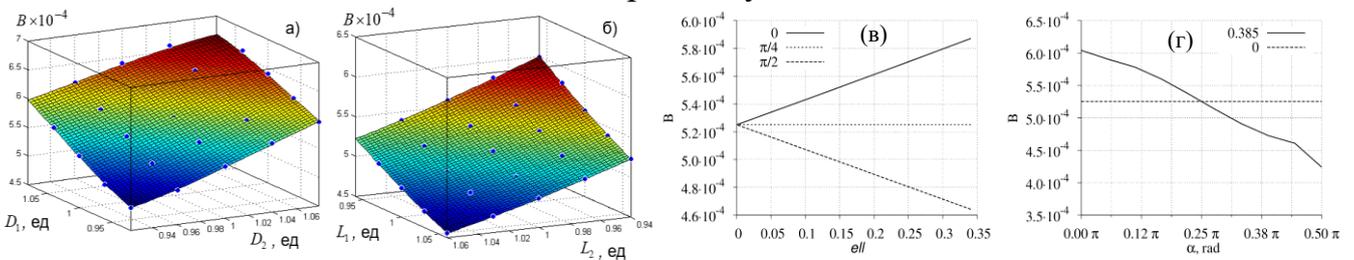


Рисунок 42 – Зависимость модового двулучепреломления световода от геометрических параметров: диаметров силовых стержней (а); расстояний от центров силовых стержней до центра волокна (б); эллиптичности светопроводящей жилы (в); угла наклона светопроводящей жилы (г)

В п.7.3 представлены результаты сравнения натуральных измерений двулучепреломления оптического волокна типа «Панда» и рассчитанных на основании численного моделирования с учетом реальной геометрии и всего технологического процесса изготовления оптических волокон. Были получены поля остаточных напряжений, и на основании соотношений (19) определены значения модового двулучепреломления. Результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с данными натуральных экспериментов для разных волокон, с геометрией как близкой к проектным значениям, так и с существенными отклонениями (рисунок 43). Полученные результаты позволяют утверждать, что математическая модель достоверно описывает термомеханические процессы, происходящие в анизотропных оптических волокнах.

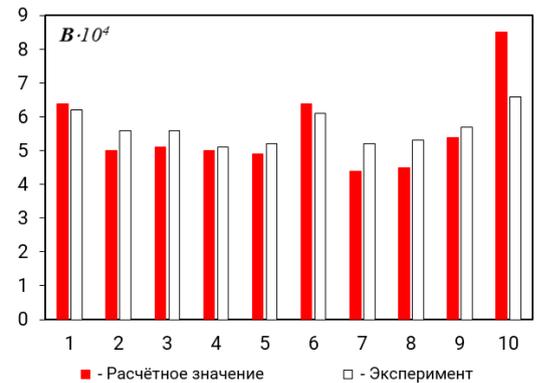


Рисунок 43 – Экспериментально измеренные и численно рассчитанные значения модового двулучепреломления B оптических волокон типа «Панда» с учетом их реальной геометрии

В п.7.4 представлены результаты численного моделирования технологической пробы, исследованы основные механизмы влияния на НДС оптического волокна в условиях термоцикла, контактного взаимодействия с алюминиевой катушкой. Задача рассматривается с учетом ЗУП и терморелаксационных переходов в нем в рассматриваемом диапазоне температур. Расчетная схема и зависимость

температуры от времени приведены на рисунках 44, 45. Установлено влияние различных параметров технологической пробы на эволюцию полей напряжений и связанных с ними оптических характеристик. На рисунке 46 приведена эволюция контактного давления для различных вариантов соотношения толщин ЗУП. Видно, что увеличение толщины внутреннего покрытия приводит к появлению характерных пиков при нагреве и охлаждении, которые связаны с релаксационными процессами в полимерах покрытия. Также рассмотрен вариант реализации технологической пробы со свободной намоткой (бухтой) волокна в условиях термоцикла, приведенного на рисунке 47. Установлено, что эволюция напряжений σ_y коррелирует с изменением экстинкции η , измеренной в натурном эксперименте.

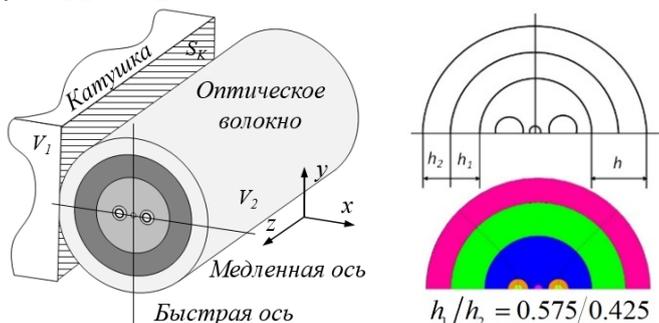


Рисунок 44 – Расчетная схема контактной задачи термовязкоупругости моделирующая намотку волокна с натягом на алюминиевую катушку, соотношение толщин ЗУП варьировалось в диапазоне 0.1:0.9-0.9:0.1

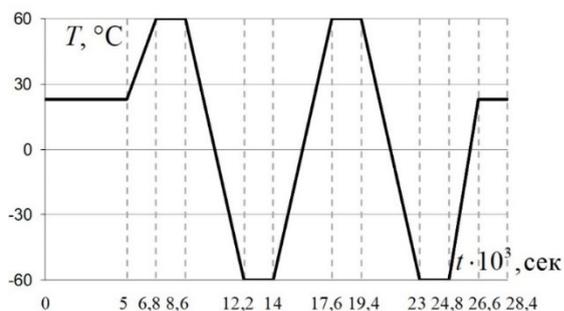


Рисунок 45 – Зависимость температуры от времени в условиях технологической пробы

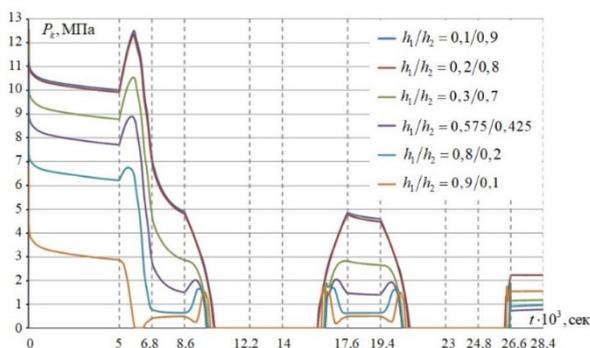


Рисунок 46 – Эволюция контактного давления на границе волокно-катушка для волокна с разной конфигурацией ЗУП

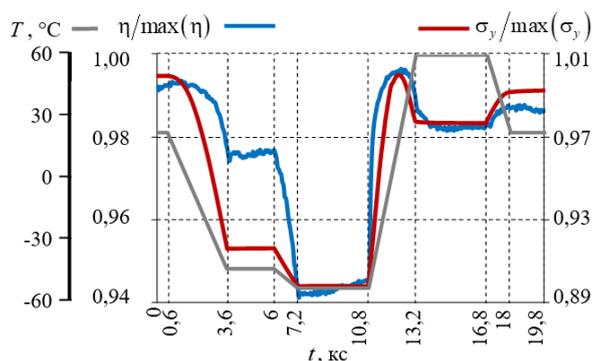


Рисунок 47 – Эволюция напряжений σ_y в центре светопроводящей жилы и измеренной в натурном эксперименте экстинкции при технологической пробе

В п.7.5 представлены результаты моделирования низкотемпературного отжига оптического волокна^{11,12}, который при температурах 300–400 °С приводит к увеличению модового двулучепреломления на 60-70%. Установлено, что наблюдаемые в экспериментах эффекты не могут быть ассоциированы с влиянием ЗУП или с результатами релаксационных процессов в стеклах. На основании численного моделирования и анализа литературных источников рассмотрена гипотеза, что рост двулучепреломления связан с усадкой закаленного стекла силовых элементов при отжиге. Показано, что увеличение среднего значения КЛТР силового стержня на 50% за счет усадки может приводить к подобному эффекту.

В заключении приведены основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования:

1. Выполнен анализ основных этапов производства специального волокна типа

¹¹ Влияние тепловой обработки на двулучепреломление световодов, сохраняющих поляризацию излучения / Дукельский К.В., Ероньян М.А., Комаров А.В. [и др.] // Сборник докладов VII Международной конференции «Прикладная оптика - 2006». – Санкт-Петербург, 2006. – С. 205-208.

¹² Enhancement of birefringence in polarisation-maintaining fibres by thermal annealing / A. Ourmazd, R. D. Birch, M. P. Varnham [et al.] // Electronics Letters. – 1983. – Vol. 19. – № 4. – P. 143-144.

«Панда», и определены соответствующие им расчетные схемы.

2. Построены определяющие соотношения линейной теории вязкоупругости для кварцевых стекол и полимеров ЗУП, работающие в широком диапазоне изменения температур, включающем релаксационный переход. На основании данных натуральных экспериментов определены материальные константы.

3. Установлено, что КЛТР полимеров существенно зависит не только от температуры, но и от скорости ее изменения. Показано, что при циклическом изменении температуры в полимерах могут формироваться остаточные деформации, обусловленные различием деформационного отклика при нагреве и охлаждении. Сформулирована методика натуральных испытаний для определения функциональной зависимости КЛТР пленочных образцов от температуры и скорости ее изменения. Для ряда полимеров впервые установлены зависимости КЛТР от температуры.

4. Построены математические модели формирования и эволюции технологических напряжений на всех этапах производства специального волокна типа «Панда» в условиях термосилового воздействия в широком диапазоне температур с учетом релаксационных переходов в стеклах и полимерах ЗУП. Выполнена численная реализация моделей методом конечных элементов.

5. Разработана и апробирована методика выбора критерия конструкционной прочности неоднородно легированных изделий из кварцевых стекол на основании серии натуральных и вычислительных экспериментов на разрушение. Получены новые данные о прочности силовых элементов для анизотропного волокна «Панда». Определены конкретные значения предельных величин для силовых стержней.

6. Выполнена постановка и решена задача оптимизации профиля легирования силового стержня для анизотропного волокна типа «Панда». Установлен оптимальный с точки зрения прочности и обеспечения максимальной температурной деформации закон легирования.

7. Установлена реальная геометрия волокна и его конструктивных элементов. Определены закономерности и диапазоны отклонений геометрии. Выполнены многопараметрические вычислительные эксперименты с учетом установленных отклонений формы геометрии, и определены основные закономерности эволюции НДС конструктивных элементов и оптических характеристик волокна. Расчетами показано значительное влияние наблюдаемых отклонений геометрии сечения на двулучепреломление волокна (до 30%).

8. Методами численного анализа установлены основные закономерности эволюции оптических характеристик волокна в ЗУП в условиях термосилового воздействия при технологической пробе.

Таким образом, в представленной работе методами механики деформируемого твердого тела выполнено комплексное исследование основных этапов процесса производства анизотропного оптического волокна типа «Панда». Предложено решение фундаментальной проблемы технологической механики специальных оптических волокон: описаны новые подходы, методики и модели, позволяющие прогнозировать НДС в изделиях из неоднородно легированных силикатных стекол и полимеров в нестационарных температурных полях с учетом происходящих в материалах релаксационных переходов. На основе разработанных моделей термовязкоупругого поведения кварцевых стекол и полимеров выполнены исследования эволюции технологических и остаточных напряжений в элементах заготовок и готовом анизо-

тропном оптическом волокне для оценки их прочности и влияния НДС на оптические характеристики волокна. Полученные результаты использованы для рационализации технологии производства анизотропных волокон типа «Панда», что позволило уменьшить количество брака и улучшить качество производимой продукции. Сформированный научный задел позволяет строить более сложные модели волоконно-оптических датчиков, предоставляя надежный инструмент для научно обоснованного проектирования оптоволоконных систем, а также выполнять замещение отдельных этапов технологического процесса решениями, основанными на отечественных продуктах, что в целом вносит значительный вклад в обеспечение технологического суверенитета РФ.

Создано проблемно-ориентированное прикладное программное обеспечение, для прогнозирования НДС изделий из стеклующихся материалов на основе численного анализа, которое позволяет исследовать термомеханическое поведение преформ для вытяжки, конструктивных элементов и готового специального волокна типа «Панда» на ключевых этапах его изготовления. Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [17, 18].

Представленные подходы, модели и методики могут быть использованы для проектирования других вариантов конструкций специальных оптических волокон, сохраняющих поляризацию, например, bow-tie, pseudo-rectangle, elliptical core, hole-assisted, elliptical jacket, side tunnel, а также датчиков на их основе.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Труфанов, А.Н.** Эволюция полей технологических напряжений в цилиндрическом силовом стержне для заготовки оптоволокон типа Panda в процессе отжига / А. Н. Труфанов // Вестник ПНИПУ. Механика – 2013. – № 1 – С.210–220.
2. **Труфанов, А.Н.** Об одном методе исследования коэффициента температурного расширения полимеров / А.Н. Труфанов // Вестник ПНИПУ. Механика – 2024. – №2. – С.5–15.
3. Shardakov I.N. Identification of the temperature dependence of the thermal expansion coefficient of polymers / Shardakov I.N., Trufanov A.N. // Polymers – 2021. – Т. 13 – № 18 – С.3035. (Q1)
4. Праведникова, Е.В. Численно-экспериментальное исследование влияния технологических несовершенств геометрии силовых стержней на напряженное состояние и оптические характеристики световода типа “Панда” / Е.В. Праведникова, Н.В. Семенов, **А.Н. Труфанов**, Н.А. Труфанов // Известия Самарского научного центра РАН – 2014. – Т. 16 – № 6 – С.89–94.
5. **Труфанов, А.Н.** Влияние технологических несовершенств формы светопроводящей жилы на напряженное состояние и оптические характеристики оптоволокон типа panda / А.Н. Труфанов, Н.А. Труфанов, Н.В. Семенов, Н.М. Стрелкова // Современные проблемы науки и образования – 2014. – №6 – С.186–194.
6. Труфанов, Н.А. Модели формирования полей технологических и остаточных напряжений в условиях релаксационного перехода (стеклования) / Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников, **А.Н. Труфанов** // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского – 2011. – № 4–5 – С.2534–2536.
7. **Trufanov, A.N.** Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers / A.N. Trufanov, O.Y. Smetannikov, N.A.Trufanov // Optical Fiber Technology –2010. –Т.16 –№3 – С.156–161.
8. **Trufanov, A.N.** 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 / A.N. Trufanov, N.A. Trufanov, N.V. Semenov // Optical Fiber Technology – 2016. – Т. 31 – С.83–91.
9. **Trufanov, A.N.** Evolution of technological stress fields in cylindrical stress applying rods for the Panda-type optical fiber during annealing / A.N. Trufanov, N.A. Trufanov, N.V. Semenov // World Applied Sciences Journal – 2013. – Т. 26 – № 10 – С.1272–1275.
10. Семенов, Н.В. Остаточные напряжения в силовых стержнях для оптического волокна «Панда» с учетом технологических несовершенств формы легированной зоны / Н.В. Семенов, **А.Н. Труфанов**, Н.А. Труфанов // Вестник ПНИПУ. Механика – 2013. – № 2 – С.133–144.
11. Семенов, Н.В. Задача выбора оптимального закона неоднородного легирования силового стержня для заготовки анизотропного кварцевого волокна типа Панда / Н.В. Семенов, **А.Н. Труфанов**, Н.А. Труфанов // Известия Самарского научного центра РАН – 2013. – Т. 15 – № 6–2 – С.484–488.
12. **А.Н. Труфанов** Выбор критерия конструкционной прочности неоднородного кварцевого стержня на основе натуральных и вычислительных экспериментов. / А.Н. Труфанов, Ю.И. Лесникова, Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников // Вычислительная механика сплошных сред – 2016. – Т. 9 – № 1 – С.97–108.
13. Lesnikova, Y.I. Contact stresses modeling at the Panda-type fiber single-layer winding and evaluation of their impact on the fiber optic properties / Y.I. Lesnikova, O.Y. Smetannikov, **A.N. Trufanov**, N.A. Trufanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2017. – Т. 177 – № 1 – С.012116.
14. Лесникова, Ю.И. Численное моделирование контактного термосилового воздействия на оптическое волокно в полимерном защитно-упрочняющем покрытии / Ю.И. Лесникова, О.Ю. Сметанников, **А.Н. Труфанов** // Научно-технический вестник Поволжья – 2018. – № 2 – С.28–31.
15. Lesnikova, Y.I. The effect of contact influence on the opticommechanical properties of Panda-type fiber under thermocycling conditions / Y.I. Lesnikova, **A.N. Trufanov** // Journal of Physics: Conference Series – 2018. – Т. 1129 – № 1 – С.012023.
16. Сметанников, О.Ю. Исследование оптико-механических характеристик волокна в условиях термоцикла / О.Ю. Сметанников, **А.Н. Труфанов**, Ю.И. Лесникова // Известия Самарского научного центра РАН – 2018. – Т. 20 – № 6–2 – С.255–260.
17. Lesnikova, Y.I. Analysis of the polymer two-layer protective coating impact on Panda-type optical fiber under bending / Y.I. Lesnikova, **A.N. Trufanov**, A.A. Kamenskikh // Polymers – 2022. – Т. 14 – № 18 – С.3840. (Q1)
18. Bulatov, M.I. Stress Relaxations at Elevated Temperatures in Optical Fibers Based on Silica Glass / M.I.Bulatov, **A.N.Trufanov**, D.A. Pankova, A.F. Kosolapov, S.L. Semjonov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2023. – Т.50 – № S14 – С.S1522–S1527.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669657 «Трехточечный изгиб заготовок силовых стержней анизотропных оптических волокон типа Panda» / Ю.И.Лесникова, **А.Н.Труфанов**, О.Ю.Сметанников, А.А.Каменских. Дата регистрации 25.10.2022.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669685 «Программа испытания анизотропного волокна типа Panda с учетом изгиба и натяга в широком диапазоне температур от –60 до +60 °С» / Ю.И.Лесникова, **А.Н.Труфанов**, О.Ю.Сметанников, А.А.Каменских. Дата регистрации 25.10.2022.