

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

На правах рукописи

Лесникова Юлия Игоревна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
ТИПА PANDA И ЕГО КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный
руководитель

кандидат технических наук,
Труфанов Александр Николаевич

Пермь, 2022

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| Глава 1. Современное состояние проблемы..... | 12 |
| 1.1 Технология изготовления анизотропных оптических волокон типа Panda | 13 |
| 1.2 Напряжённое состояние в анизотропных оптических волокнах | 17 |
| 1.3 Защитно-упрочняющие покрытия для волокон..... | 20 |
| 1.4 Физико-механические свойства кварцевых стекол | 22 |
| Выводы по главе 1..... | 23 |
| Глава 2. Общая математическая постановка задач технологической механики оптических волокон | 26 |
| 2.1 Модель формирования остаточных напряжений в стеклующихся материалах | 26 |
| 2.2 Модель трехточечного изгиба силовых стержней..... | 30 |
| 2.3 Модель технологической пробы..... | 32 |
| Выводы по главе 2..... | 38 |
| Глава 3. Конструкционная прочность силовых стержней | 39 |
| 3.1 Объект исследования..... | 39 |
| 3.2 Натурные эксперименты по разрушению стержней | 41 |
| 3.3 Численные эксперименты по разрушению силовых стержней..... | 45 |
| 3.3.1 Технологические остаточные напряжения..... | 46 |
| 3.3.2 Математическое моделирование в условиях трехточечного изгиба | 49 |
| 3.4 Моделирование высокотемпературного отжига образцов | 56 |
| Выводы по главе 3..... | 58 |
| Глава 4. Численное моделирование термомеханического поведения анизотропного волокна типа Panda в условиях технологической пробы | 60 |
| 4.1 Технологические остаточные напряжения в волокне типа Panda | 61 |
| 4.2 Численное исследование характера сопряжения защитно-упрочняющего покрытия и оптического волокна в модели технологической пробы | 63 |

| | |
|---|-----|
| 4.3 Влияние радиуса намотки на эволюцию технологических напряжений и оптические характеристики волокна типа Panda | 68 |
| 4.4 Влияние несоосности оси светопроводящей жилы и центра волокна на эволюцию технологических напряжений и оптические характеристики волокна типа Panda | 72 |
| 4.5 Влияние геометрической конфигурации защитно-упрочняющего покрытия | 76 |
| 4.5.1 Влияние на напряженно-деформированное состояние..... | 77 |
| 4.5.2 Влияние на оптические характеристики | 80 |
| 4.6 Численное моделирование технологической пробы с учетом зависимости коэффициента термического расширения от температуры..... | 84 |
| 4.7 Численное моделирование свободной намотки волокна типа Panda с учетом зависимости коэффициента термического расширения от температуры..... | 87 |
| Выводы по главе 4..... | 91 |
| Заключение | 94 |
| Список литературы | 95 |
| Приложение А | 111 |
| Приложение Б..... | 112 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В науке и технике широко используются оптические волокна, которые обладают уникальными характеристиками. В отдельный класс выделяют специальные типы волокон, например, анизотропное одномодовое волокно типа Panda. Оно представляет собой гетерогенную конструкцию из легированных кварцевых стекол в полимерном защитно-упрочняющем покрытии (ЗУП) и способно сохранять состояние поляризации введенного света за счет разницы показателей преломления вдоль осей поляризации, вызванной наведением напряженного состояния в светопроводящей жиле. В конструкции предусмотрены специальные силовые элементы с отличными от основного материала волокна термомеханическими свойствами (КЛТР, вязкость, температура стеклования и т.д.). Данный эффект достигается за счет легирования кварцевого стекла. Чем выше степень легирования, тем большую температурную деформацию могут обеспечить стержни в волокне при изготовлении, для формирования разницы показателей преломления. Однако высокие концентрации легирующих оксидов могут приводить к разрушению заготовок силовых элементов в процессе их изготовления и эксплуатации. Волокно Panda используют для изготовления чувствительного контура волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), который является важной компонентой современных навигационных приборов. Температуры от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$ относятся к эксплуатационному диапазону ВОГ, требования по корректной работе конструкции в котором жестко регламентируются. В этот диапазон частично попадают релаксационные переходы полимеров ЗУП. Напряженно-деформированное состояние (НДС) светопроводящей жилы и конечных изделий зависит от поведения материалов, из которых изготовлено волокно. При термосиловом нагружении с разными режимами изменения температуры и нагрузки НДС жилы будет непрерывно изменяться во времени, меняя оптические характеристики волокна, что будет отражаться на показаниях прибора. Данный эффект связан с релаксационными процессами в полимерах ЗУП и развитием ползучести.

В настоящий момент широко распространено моделирование волокон и их конструктивных элементов в рамках термоупругости, что дает первое приближение, не позволяющее учитывать релаксационные процессы, свойственные конструкциям из стеклюющихся материалов. В большинстве моделей не рассматривается влияние полимеров ЗУП, моделирование происходит при постоянной температуре или в узком диапазоне изменения. Рассматривается идеальная проектная геометрия или конструктивные элементы учитываются в рамках осреднения физико-механических свойств. Поэтому актуальной является задача моделирования поведения анизотропных оптических волокон и их конструктивных элементов в рамках термовязкоупругости в эксплуатационном диапазоне температур ВОГ, для оценки влияния термосилового воздействия на их оптические характеристики.

Степень разработанности темы. Для моделирования термомеханического поведения анизотропных оптических волокон и их конструктивных элементов необходимо прогнозировать их напряженное состояние после изготовления. Построению моделей формирования НДС в стеклюющихся материалах с учетом их реономных свойств посвящены работы В.Л. Инденбома, А.А. Ильюшина, Б.Е. Победри, И.И. Бугакова, L.D. Coxon, J.G. Williams, О.В. Мазурина, Г.М. Бартенева, О.Ю. Сметанникова, Н.А. Труфанова, И.Н. Шардакова, В.П. Матвеевко и других ученых. Однако подавляющее большинство моделей для анизотропных волокон (Е.М. Дианов, К. Okamoto, К. Tsai, М. Fontaine и другие) представлено в термоупругой постановке, отличающейся только выбором начала отсчета температурной деформации. Также существует достаточно большое количество исследований, посвященных моделированию волокон типа Panda в рамках ряда упрощений: исключение из модели конструктивных элементов с осреднением свойств (D. Wong, И.А. Есипенко, М.А. Савин, Y. Zhang); модели без учета защитного покрытия (P. Lesiak, J. Liu, В. Hopf, М. Li); при комнатной температуре или в узком диапазоне температур (F. Esposito, X. Zhang, X. He) и т.д. Поэтому остается актуальной задача моделирования волокна и его конструктивных элементов в термовязкоупругой постановке, с учетом свойств,

зависящих от температуры, позволяющая учитывать релаксационные процессы, свойственные конструкциям из стеклующихся материалов и полимеров.

Цель работы – разработка математических моделей термовязкоупругости анизотропного оптического волокна типа Panda и его конструктивных элементов для изучения основных закономерностей деформационного и оптического поведения изделия на этапах изготовления.

Задачи:

1. Выполнить постановку задач изготовления силовых стержней и промежуточного испытания волокна типа Panda в условиях технологической пробы с учетом особенностей технологического процесса.

2. Построить математическую модель поведения заготовки силового стержня с учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений для анализа условий разрушения на различных этапах производства.

3. Разработать методику выбора и определить критерий прочности заготовки силового стержня на основе анализа количественных значений критериальных характеристик, полученных в рамках серии численных и натуральных экспериментов на разрушение.

4. Построить математическую модель волокна Panda с учетом термомеханики полимерных материалов защитно-упрочняющего покрытия для описания эволюции технологических напряжений в условиях термосилового воздействия.

5. Выполнить комплексные исследования основных закономерностей влияния защитно-упрочняющих покрытий на эволюции напряженно-деформированного состояния и оптических характеристик волокна Panda в условиях термосилового воздействия на основе серии вычислительных экспериментов.

Научная новизна.

1. Впервые построены пространственные параметризованные математические модели с физическими соотношениями теории вязкоупругости для анизотропных оптических волокон типа Panda и его конструктивных элементов.

2. Впервые получены величины критериальных характеристик прочности заготовок силовых стержней с учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений на основе комплексного численно-экспериментального исследования.

3. Разработаны новые программные модули для конечно-элементного программного пакета ANSYS Mechanical APDL, позволяющие моделировать термовязкоупругое поведение оптического волокна Panda и заготовки силового стержня, в которых реализован алгоритм учета температурных функциональных зависимостей термомеханических свойств материалов защитно-упрочняющих покрытий.

4. Впервые выполнено математическое моделирование термовязкоупругого поведения волокна Panda с учетом полимерного защитно-упрочняющего покрытия при сложном термосиловом нагружении с анализом эволюции напряженно-деформационного состояния и оптических характеристик конструкции.

5. Получены новые закономерности эволюции полей технологических напряжений и связанных с ними оптических характеристик волокна Panda в защитно-упрочняющем покрытии в условиях термосилового воздействия и сложного напряженно-деформированного состояния на основе комплексного исследования с применением вычислительных экспериментов.

Практическая и теоретическая значимость. Предложенные математические модели, алгоритмы и вычислительные программы использованы в технологических процессах производства и тестирования оптических волокон типа Panda в ПАО «ПНППК». Результаты, полученные в процессе исследования, позволили сформировать рекомендации, новые подходы и технологические решения, что дало возможность улучшить характеристики конечной продукции из анизотропного волокна.

Актуальность проблемы исследования обусловлена необходимостью формирования фундаментальных основ методологий решения прикладных задач технологической механики анизотропных волокон, имеющих выраженный

междисциплинарный характер. Решение данной проблемы актуально с теоретической точки зрения, как развитие численных методов решения задач термовязкоупругости неоднородных стеклюющихся тел, а также с позиций необходимости создания теоретических основ прикладных разделов технологической механики, связанных с проектированием изделий из неоднородно легированных кварцевых стекол и расчетами параметров технологических процессов изготовления оптоволокна и его компонент.

Методы и методология исследования. Для решения поставленных задач были использованы математический аппарат и численные методы механики деформированного твердого тела. Численное моделирование осуществлено методом конечных элементов, реализованным в проблемно-ориентированном программном комплексе ANSYS Mechanical средствами параметрического языка программирования APDL. Экспериментальная установка Instron 8801 ЦКП «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ использовалась для реализации схемы трехточечного изгиба заготовок силовых стержней при испытании на прочность.

Положения, выносимые на защиту.

1. Трехмерная параметризованная математическая модель испытания на трехточечный изгиб заготовок силовых стержней анизотропных оптических волокон типа Panda, отличающаяся учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений.

2. Новые результаты по критериальным характеристикам конструкционной прочности заготовок силовых стержней анизотропного волокна типа Panda на основе комплексного численно-экспериментального исследования.

3. Трехмерная параметризованная математическая модель анизотропного оптического волокна типа Panda с полимерным защитно-упрочняющим покрытием, отличающаяся учетом зависимости коэффициента термического расширения (КТР) от температуры, реономного поведения полимерных материалов и протекающих в них релаксационных процессов.

4. Новые результаты об эволюции полей технологических напряжений и оптических характеристик волокна Panda, установленные в результате комплексного исследования на основе вычислительных экспериментов, в том числе при отклонениях от проектной геометрии конструктивных элементов и защитно-упрочняющих покрытий.

Степень достоверности. Обеспечивается сходимостью вычислительных алгоритмов программ, качественным и количественным соответствием результатов моделирования данным натуральных экспериментов и известным решениям других авторов на удовлетворительном уровне.

Личный вклад автора. Все отраженные в диссертации результаты получены автором лично или с его непосредственным участием. Разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ на их основе, реализация численных экспериментов и визуализация результатов выполнены диссертантом лично или при его непосредственном участии. В работе [1] автор принимал непосредственное участие в реализации серии натуральных испытаний; численное моделирование задачи, серия вычислительных экспериментов, обработка и анализ результатов выполнены совместно с научным руководителем А.Н. Труфановым. В работах [2-3] диссертанту принадлежат разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ, проведение серии численных экспериментов, визуализация результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем А.Н. Труфановым. Работа [4] выполнена автором лично и без соавторов. В работе [5] автору принадлежит постановка задачи, численное моделирование и обработка результатов. В статье [6] численная реализация модели без учета изгиба и вычислительные эксперименты выполнены А.Н. Труфановым и О.Ю. Сметанниковым; автором разработана модель с учетом изгиба, выполнена ее численная реализация на ЭВМ, проведена серия численных экспериментов и их анализ. В работах [7-8] диссертанту принадлежат разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ, проведение серии численных экспериментов, визуализация результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем А.Н. Труфановым. В работах [2-4, 6-8] автором лично разработан

алгоритм перехода от деформационных параметров к оптическим и выполнена его численная реализация. В работе [9] автор единолично реализовал процедуру имплантации зависимости КТР от температуры в проблемно-ориентированном программном комплексе ANSYS, работа выполнена без соавторов. Интерпретация результатов и подготовка публикаций [1-3, 5-8] выполнена совместно с соавторами. Диссертантом совместно с соавторами подготовлено две программы для ЭВМ, личный вклад автора: [10] разработка плоской модели заготовки силового стержня, моделирование поля остаточных деформаций, создание трехмерной модели и технологии имплантации поля остаточных деформаций в рамках моделирования технологического процесса, моделирование трехточечного изгиба заготовки; [11] имплантация моделей поведения материалов защитно-упрочняющих покрытий в программный комплекс ANSYS, моделирование остаточных напряжений в волокне после вытяжки, создание трехмерной параметризированной модели однорядного натяга оптического волокна на алюминиевую катушку с постоянной силой натяжения в рамках механики контактного взаимодействия.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» (г. Пермь, 2015 г), на XXV и XXXI Всероссийской школе – конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2016 и 2022 г.), на 6-й и 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (г. Москва, 2016 и 2018 г.г.), на XX, XXI и XII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2017, 2019 и 2021 г.г.), на XX, XXI и XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2017, 2019 и 2021 г.г.), на XII и XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (г. Алушта, 2018 и 2022 г.г.), на Всероссийской

конференции молодых ученых-механиков (г. Сочи, 2018, 2021 и 2022 г.г.), на XIV Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2020 г.), на Международной конференции Уфимская осенняя математическая школа (г. Уфа, 2021 и 2022 г.г.), на XVI Всероссийской школе-конференции молодых ученых (г. Новосибирск, 2022 г.). Результаты работы использованы в рамках проектов РФФИ 13-08-96036, 16-48-590660 и 20-48-596009, договора №2015/305 с ПАО «ПНППК», государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSNM-2020-0026).

Диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» (рук. проф. В.Ю. Столбов), кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» (рук. проф. П.В. Трусов), кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» (рук. проф. А.Н. Аношкин) ПНИПУ, Института механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеев), Научного центра волоконной оптики РАН (рук. д.ф.-м.н. С.Л. Семенов), кафедры вычислительной и экспериментальной механики ПГНИУ (рук. доц. В.Н. Терпугов).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 35 печатных работ: в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus/Web of Science, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 статья в журнале, входящем в перечень РИНЦ, 24 тезиса докладов на российских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 113 страницах, содержит 61 иллюстрацию и 12 таблиц. Список литературы включает 140 наименований.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В науке и технике широко используются оптические волокна, которые обладают уникальными характеристиками. В сфере телекоммуникаций они позволяют передавать сигнал на большие расстояния без потерь и с высокой скоростью [12], используются для доставки света в труднодоступные места, а также для декоративного и ландшафтного освещения [13,14]. Другой сферой применения является измерение и фиксация параметров систем, анализ и мониторинг состояния объектов исследования [15,16]. С их помощью можно измерять температуру [17,18], деформацию [18,19], давление [20], изгиб [21], силу тока [22], качество воздуха [23], наличие химических и биологических веществ [24], угловую скорость [25,26] и другие параметры.

При этом можно отметить, что одной из самых активно развивающихся сфер использования оптических волокон является их внедрение в оптоволоконные датчики в качестве чувствительного элемента. Для этого используют разные типы волокон: многомодовые [20], одномодовые [22], специальные (фотонно-кристаллические [27], с полым сердечником [25], сохраняющие поляризацию излучения [28] и другие) или их комбинации [17, 19,21]. Использование оптических волокон разного типа, отличающихся геометрической конфигурацией и физико-механическими характеристиками материалов, обусловлено необходимостью создания условий для регистрации состояния объекта исследования. Одним из распространенных видов оптических волокон является специальное одномодовое анизотропное волокно типа Panda, сохраняющее состояние поляризации вводимого в него излучения [29,30].

От обычных связных волокон оно отличается тем, что его конструкция предусматривает введение специальных элементов (силовые стержни), которые имеют высокую степень легирования, увеличивающую их коэффициент температурного расширения. При вытяжке такого волокна в нем формируется поле остаточных напряжений, которое в силу фотоупругого эффекта создает условия сохранения поляризации света в светопроводящей жиле. Это пример полезного применения остаточных напряжений, которые формируются из-за

несовместности температурных деформаций при охлаждении волокна от 2000°C до комнатной температуры в процессе его вытяжки. Этому способствует неоднородность термомеханических свойств материалов волокна и пространственно-временная неоднородность перехода материалов через диапазон температур стеклования.

При этом материал остается изотропным, а среда прохождения света становится анизотропной с разными показателями преломления по осям поляризации. Такое волокно пропускает только две взаимно перпендикулярные моды электромагнитных колебаний. А увеличение разности показателей преломления по осям поляризации приводит к разным скоростям распространения волн по волокну, что затрудняет появление связи между модами и создает условия сохранения поляризации света.

1.1 Технология изготовления анизотропных оптических волокон типа Panda

Технология изготовления анизотропных кварцевых волокон рассмотрена в работах [31-33] и включает 7 этапов (рисунок 1.1). На первом этапе изготавливают светопроводящую жилу и силовой стержень методом модифицированного химического парофазного осаждения MCVD (рисунок 1.2). Этот метод позволяют создавать любые конфигурации слоев различного состава. В опорную трубку из чистого кварцевого стекла подают смесь из очищенного кислорода, хлорида кремния SiCl_4 и необходимых легирующих добавок (BCl_3 , POCl_3 , GeCl_4 и т.д.). Вдоль опорной трубки перемещается горелка, создающая зону разогрева. В ней происходит процесс окисления с выделением оксидов кремния и легирующих добавок и их последующее осаждение на внутреннюю поверхность опорной трубки. Порошок SiO_2 с присадками плавится и превращается в сплошной стеклянный слой.

После того как осаждение нужного количества слоев завершено начинается усаживание (схлопывание) трубки (рисунок 1.3). Температуру и скорость перемещения горелки увеличивают, при этом опорная трубка размягчается и под действием сил поверхностного натяжения схлопывается в сплошной цилиндр

диаметром 10 мм и длиной около 500 мм. После схлопывания заготовки охлаждаются на воздухе до температуры окружающей среды (20 С).



Рисунок 1.1 – Этапы изготовления анизотропного оптического волокна типа Panda

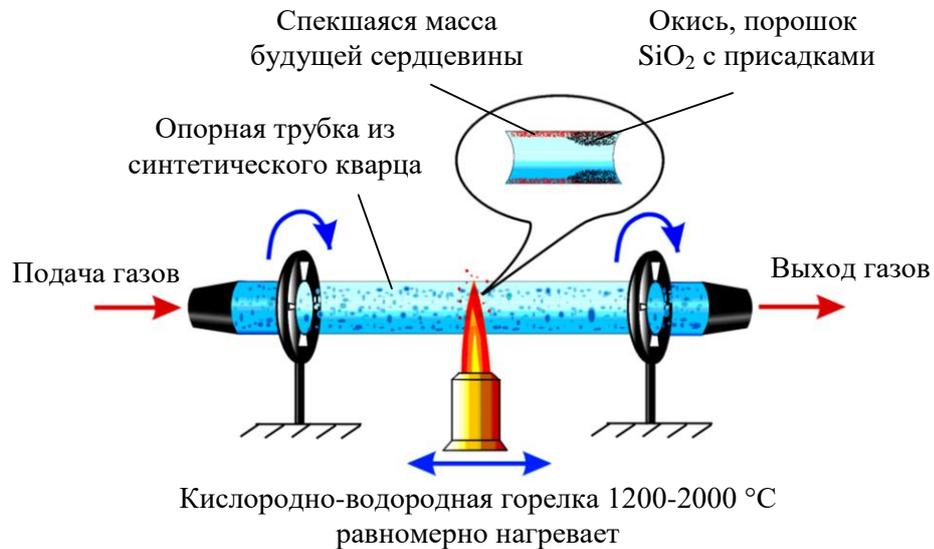


Рисунок 1.2 – Процесс осаждения слоев в методе MCVD

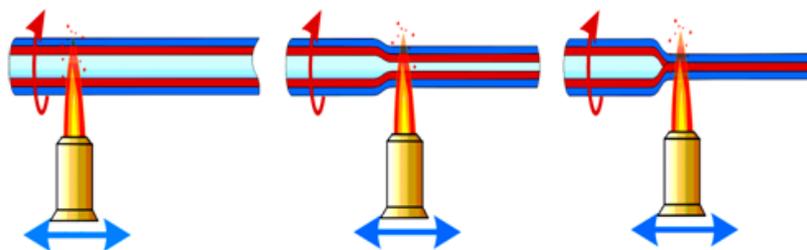


Рисунок 1.3 – Схлопывание заготовки в методе MCVD

На этом этапе существует проблема, заключающаяся в том, что заготовки силовых стержней после охлаждения или в процессе ожидания следующей манипуляции могут разрушаться. Это приводит к большим процентам брака и экономическим потерям. Причиной разрушения являются высокие уровни остаточных технологических напряжений из-за легирования силового стержня, которое изменяет свойства стекла. Чем выше степень легирования, тем больший уровень напряжений будет в силовом стержне. Однако высокие концентрации легирования позволяют стержню обеспечить наибольшую температурную деформацию при вытяжке оптического волокна для формирования необходимого специфического поля напряжений в светопроводящей жиле. Так возникает противоречие между необходимым уровнем температурных деформаций, которые могут обеспечить силовые стержни в светопроводящей жиле для формирования требуемых оптических характеристик волокна и сохранением его прочности.

На следующем этапе контролируют качество изготовленных заготовок. Заготовку со светопроводящей жилой «жакетируют», т.е. наращивают внешний диаметр заготовки до требуемого размера (рисунок 1.4а). Далее проводят механическую обработку полученных заготовок. С заготовки силового стержня частично стравливают плавиковой кислотой или шлифуют абразивными материалами наружные нелегированные слои с целью уменьшения расстояния между силовым стержнем и светопроводящей жилой в преформе волокна (рисунок 1.4б).

Затем в заготовке светопроводящей жилы сверлят отверстия и вставляют туда силовые стержни (рисунок 1.4в), получая преформу волокна Panda.

На 6 этапе проводят непосредственно вытяжку волокна из преформы. Подготовленную преформу помещают в механизм подачи (рисунок 1.5), нижний

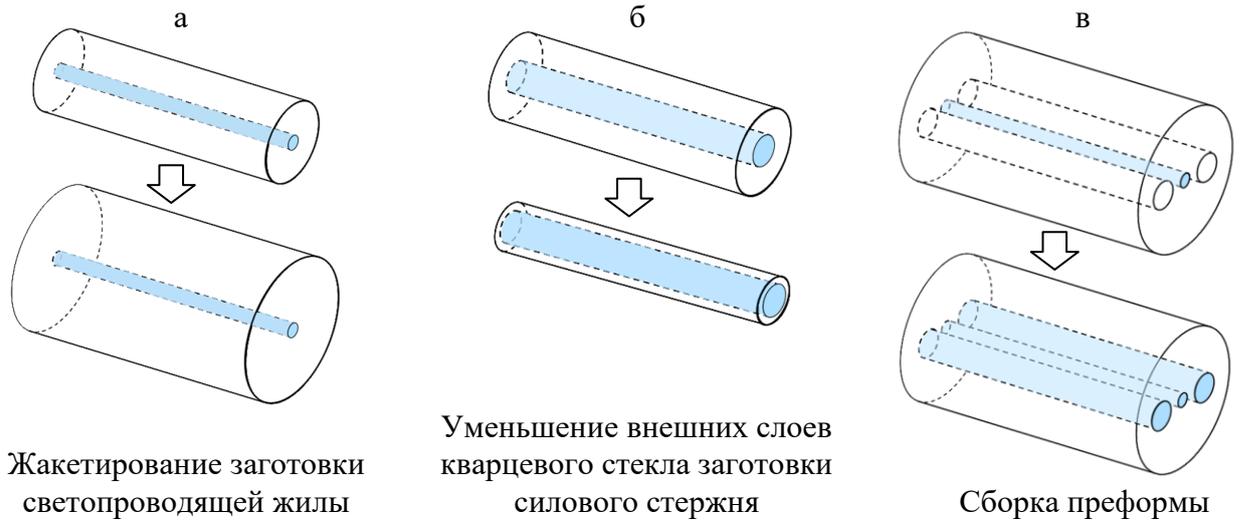


Рисунок 1.4 – Механическая обработка заготовок и сборка преформы волокна Panda

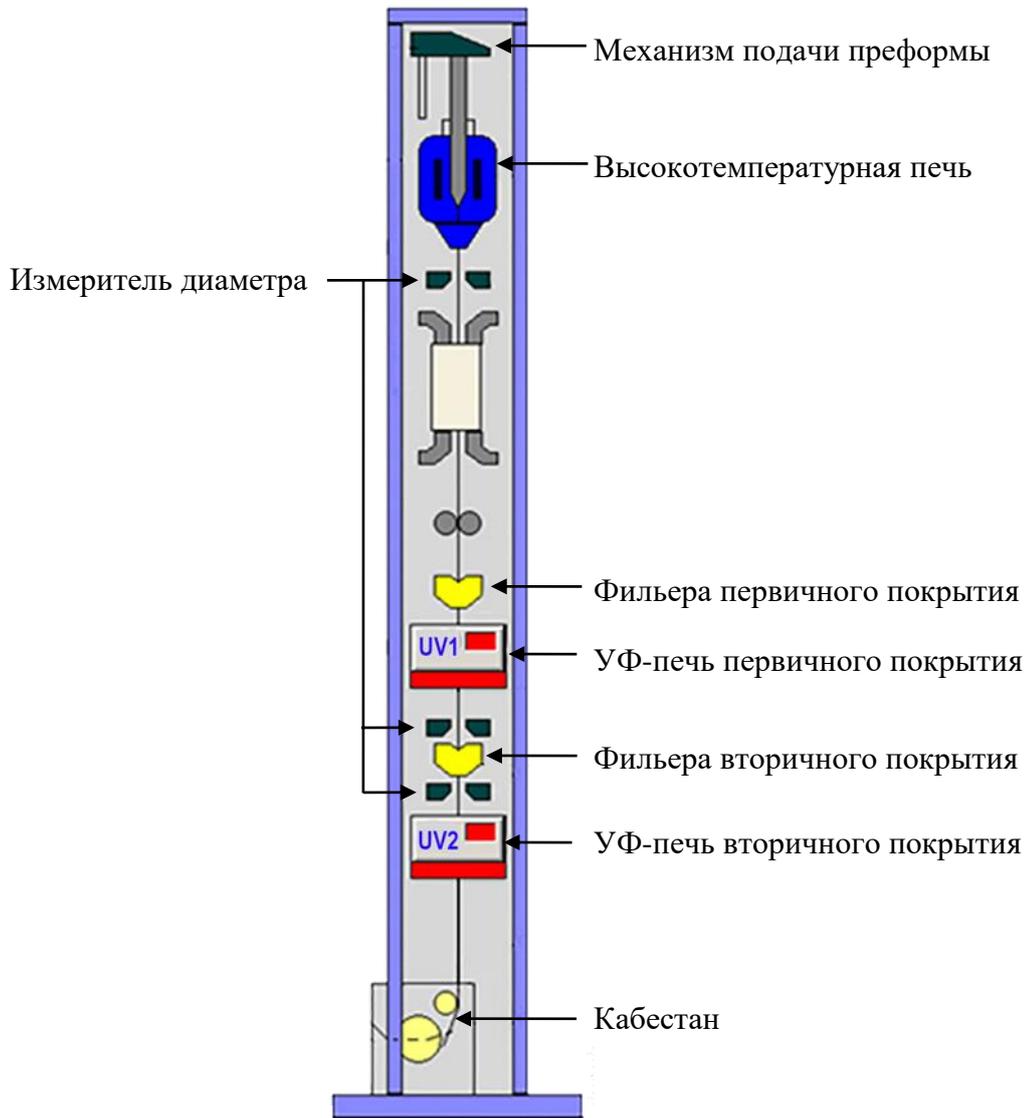


Рисунок 1.5 – Башня для высокотемпературной вытяжки волокна Panda

ее конец находится в высокотемпературной печи. Там она разогревается до температур выше 2000 °С и из нее вытягивается стеклянная нить диаметром 80 мкм. В процессе вытяжки на нее наносят два слоя защитно-упрочняющего покрытия, которые отверждаются под воздействием УФ-излучения. В процессе изготовления контролируются все параметры (скорость подачи преформы в печь, температура в печи, скорость вытяжки, диаметры волокна и покрытий и т.д.).

Последний этап заключается в контроле качества получившегося волокна. Существует целая система испытаний, в которой оцениваются геометрические и оптические характеристики, механическая прочность, наличие повреждений или трещин и т.д. Проводят испытания влияния внешних термосиловых параметров на работу волокна. В зависимости от результатов испытаний принимают решение о дальнейшем использовании волокна.

Исследуемое в работе волокно типа Panda используется для создания волоконно-оптического гироскопа. Одно из испытаний для отбора волокна, подходящего под требования использования в ВОГ, называется технологическая проба, которая заключается в термоциклировании по заданному закону в диапазоне температур [-60°С; +60°С] свободной намотки волокна по большому диаметру с контролем коэффициента экстинкции. Однако, волокно, успешно прошедшее данное испытание, не всегда хорошо показывает себя в приборе. Поэтому возникает проблема совершенствования процедуры технологической пробы с целью более тщательного отбора волокон для ВОГ в приближенных к реальным условиям.

1.2 Напряжённое состояние в анизотропных оптических волокнах

Анизотропные оптические волокна нашли широкое применение, поэтому вопросам их изготовления и эксплуатации посвящено большое количество исследований разных лет. Масштабные исследования ведутся в Научном центре волоконной оптики РАН, созданном Е.М. Диановым. Они обобщены в работах коллективов авторов Е.М. Дианов, В. Л. Богатырев, М. М. Бубнов, А.Н. Гурьянов, С. Л. Семенов [34-38]. Также исследования представлены в работах коллективов

авторов С. В. Буреев, К. В. Дукельский, М. А. Ероньян, А.Ю. Кулеш [39-42], А.Б. Мухтубаев, С.М. Аксарин [43-44], И.С. Азанова, П.Ф. Кашайкин [38,45], Богачков И. В. [46-47], F. Esposito [29], X. Li [48,49], Y. Park, U.C. Paek, D Y. Kim [50] и другие. Вопросы прочности и разрушения раскрыты в работах А.А. Дяченко и О.Е. Шушпанова [51,52], С.Л. Семенова [53,54], Булатова М.И. [55,56], С.Р. Kurkjian и Р.К. Gupta [57-59], G. S. Glaesemann [60]. В работах [49, 50, 61-63] приведена связь между напряженно-деформированным состоянием и оптическими характеристиками волокна.

В анизотропном оптическом волокне напряженно-деформированное состояние сформировано специально для обеспечения разных показателей преломления по осям поляризации. Поэтому особое внимание уделяют разработке математических моделей, описывающих процесс формирования остаточных напряжений внутри волокна.

Оптическое волокно состоит из кварцевого стекла, которое, как и полимеры, при нагревании или охлаждении переходит через релаксационный переход, т.е. материал в определенном диапазоне температур меняет состояние из твёрдого в вязкотекучее или из вязкотекучего в твёрдое соответственно. Но такой переход, связанный с изменением жесткости, не является фазовым, т.к. кварцевое стекло является аморфным материалом [64-66].

В 1978 году I. P. Kaminow и V. Ramaswamy [67] дали оценку НДС и связанных с ним оптических характеристик прообраза анизотропного волокна в виде трехслойной пластины. В последующих работах [49, 62, 68-72] рассматривалось уже волокно, но для описания формирования остаточных напряжений была использована простейшая термоупругая постановка, в которой напряжения прямо пропорциональны разности конечной и начальной температур. В такой постановке напряжения возникают из-за отличий в коэффициентах температурного расширения конструктивных элементов (в результате несовместности температурных деформаций). Закон изменения температуры, скорость охлаждения и процесс стеклования не учитывается. В работах R. Guan (980°C) [62], M. Li (1250 °C) [49] в качестве начала отсчета температурной

деформации принималась температура разогрева заготовки при вытяжке. В работах Е.М. Дианова (1250 °С) [69], К. Okamoto (650 °С) [68] – температура стеклования легированной части волокна. В работах К. Tsai [61], Y. Liu (1000 °С) [70] – температура стеклования материала волокна. Есть работы, например, М. Fontaine (800-1000 °С) [71], J.-I. Sakai (800-1100 °С) [72], где температура не конкретизирована. Выбор температуры достаточно широкий и может использоваться в некотором смысле для подгонки результатов или в качестве первого приближения решения задачи. Термоупругая постановка не позволяет моделировать релаксацию остаточных напряжений в процессах отжига, которые сопровождают некоторые этапы в технологии изготовления оптического волокна типа Panda.

Есть работы, посвященные описанию релаксационного перехода в стеклюющихся материалах: А.А. Ильюшин и Б.Е. Победря [73], И.И. Бугаков [74, 75], В. Шаффер и М. Левитский [76,77], О.Ю. Сметанников, Н.А.Труфанов, И.Н. Шардаков [78]. Каждая модель по-своему адаптирована для изучения механического поведения вязкоупругих материалов. Однако приведенные модели не нашли применения для описания напряженно-деформированного состояния в анизотропных оптических волокнах.

Прочность оптических волокон и заготовок для них значительно отличается. Основное влияние на прочность оптических волокон оказывает наличие внутренних и поверхностных дефектов, примесей, параметры вытягивания волокна (температуры, натяжения и чистоты высокотемпературной зоны), наличие защитного покрытия [53,55,79]. Прочность заготовок для оптических волокон зависит от технологии производства стекла, наличия остаточных напряжений, химического состава и размера, параметров испытания (температуры, скорости, длительности нагружения), физико-химических свойств окружающей среды и вида деформации [51,52,57,64,80]. Информация о пределе прочности на растяжение для стёкол с характерными размерами 10^{-2} м различается. Он может изменяться в несколько раз и достигать 20...70 МПа [81,82]. Предел прочности для волокон с характерными размерами 10^{-4} м может достигать 5,5 ГПа

при нормальных условиях внешней среды [79]. Данные о прочности силовых стержней в известной автору литературе отсутствуют.

1.3 Защитно-упрочняющие покрытия для волокон

В процессе вытяжки на оптическое волокно обязательно наносят защитное покрытие, которое ограждает поверхность волокна от контакта с частицами пыли или влаги, которые существенно снижают его прочность [83-84]. Кроме того, покрытия защищают волокно от химических и механических повреждений, снижают воздействие микроизгибов на его оптические характеристики и т.д. Материал покрытия определяет возможные области практического применения волокна. Условно их можно разделить на металлические [55,56,79,85], углеродные [79,86] или полимерные [55,79,87]. Основные материалы полимерных покрытий в волоконной промышленности – это акрилаты, силиконы и полимеры, отвержденные УФ-излучением. Вид применяемого покрытия зависит от температурного диапазона эксплуатации и области применения. Обычно защитное покрытие делают из одного или более слоев полимеров, подобранных под решение конкретных задач [79,88]. В рассматриваемом в рамках исследования волокне используется двухслойное УФ-отверждаемое полимерное покрытие с первичным покрытием из DeSolite 3471-1-152A и вторичным покрытием из DeSolite DS-2015. В [89,79] выявлены релаксационные переходы в материалах DeSolite 3471-1-152A и DeSolite DS-2015 в эксплуатационном диапазоне температур волоконно-оптического гироскопа [-60°C; +60°C], которые вносят свой вклад в напряженно-деформированное состояние конструкции.

В большинстве исследований оптического волокна типа Panda [49,63,91] не рассматривается влияние полимеров защитного покрытия, хотя есть опубликованные работы, подтверждающие влияние защитных покрытий на НДС и оптические характеристики волокна [79, 92-95], прочность [79,96]. Например, P. Lesiak and T. Wolinski [97] рассмотрели влияние полимеризационной усадки композиционного материала, в который встроено волокно Panda без ЗУП. Отмечают, что такой процесс изменяет начальное распределение напряжений

внутри волокна из-за его деформации. М. Li с соавторами [49] рассмотрел влияние изменения геометрии светопроводящей жилы на двулучепреломление. Все приведенные исследования рассматривают задачи в плоской упругой постановке.

В работах Y. Zhang [48], A. Gillooly [95], И.А. Есипенко [98], М.А. Савина [99], защитное покрытие учитывается, но свойства материалов берутся в качестве констант, без учета вязкоупругой природы материалов, присущей применяемым типам покрытий. Для моделирования используются упрощенные модели волокна с осреднением свойств до смеси материалов, без структуризации поперечного сечения волокна [48, 92, 94, 98, 99].

На способность волокна сохранять состояние поляризации вводимого в него излучения сильное влияние оказывает температура [93,100], а ВОГ должен без ошибок работать от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Температура влияет как на полимеры защитно-упрочняющего покрытия [65,89,93], в которых происходят релаксационные переходы, так и на само волокно [79,93], представляющее гетерогенную конструкцию из стекол с разными КТР. У защитных покрытий и кварцевой части волокна также разные КТР. Если волокно будет находиться в стесненных условиях, например, при создании чувствительной катушки ВОГ, то могут появиться дополнительные напряжения со стороны покрытия при изменении температуры. Однако часто моделирование происходит при комнатной температуре или в узком диапазоне изменения [29, 30, 49, 87, 98-100]. Это связано с необходимостью учета зависимости свойств материалов от температуры и построением сложных моделей поведения материалов.

Есть большое количество работ, посвященных оценке влияния покрытий [55, 56, 92] и внешних термосиловых параметров на волокно, таких как диаметр намотки [101-104], температура [29,43,94,101,105,106]. Но чаще это эмпирические исследования без построения математических моделей.

1.4 Физико-механические свойства кварцевых стекол

Основной материал, используемый для изготовления оптических волокон, это кварцевое стекло. Оно обладает уникальными характеристиками: самое низкое поглощение в видимой и инфракрасной областях спектра, малые внутренние потери на рассеивание, высокая прозрачность, химическая стойкость к агрессивным средам и т.д. Большой спектр исследований посвящен изучению свойств чистого кварцевого стекла и их зависимостям от температуры [80,107-112]. Упругие свойства кварцевого стекла незначительно зависят от температуры (рисунок 1.6) [111, 112]. Кварцевое стекло обладает очень низким и практически не изменяющимся с температурой КТР, а вот вязкость как раз наоборот меняется на порядки в зависимости от температуры (рисунок 1.7).

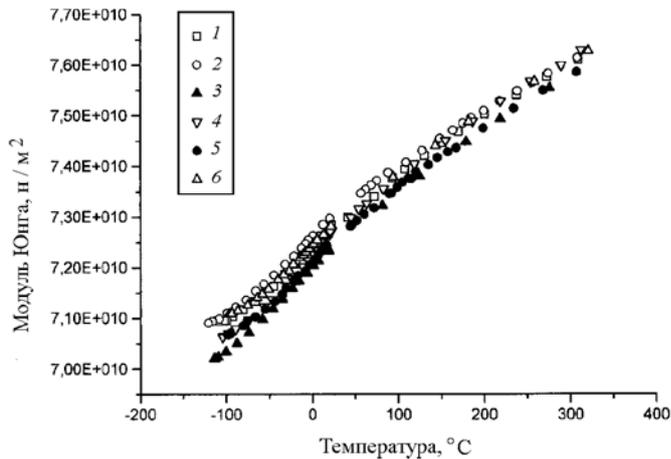


Рисунок 1.6 – Температурная зависимость модуля Юнга для различных марок кварцевых стекол: 1 – KB, 2 – P, 3 – КУ-1, 4 – Suprasil-300, 5 – КУВИ, 6 – КС4В [111]

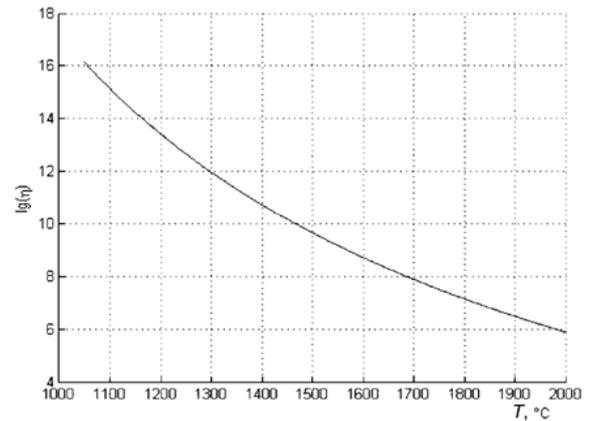


Рисунок 1.7 – Температурная зависимость вязкости чистого кварцевого стекла [113]

Но для конструктивных элементов волокна (светопроводящая жила и силовые стержни) используют легированные кварцевые стекла. В качестве легирующих добавок выступают B_2O_3 , P_2O_5 и GeO_2 . Степень легирования может меняться в пределах от 1 до 30%. Анализ литературных данных свидетельствует о значительном влиянии легирующих добавок на некоторые свойства стекол: показатель преломления, вязкость, КТР, температура стеклования [80,109,114, 115]. Добавки оксида бора и фосфора приводят к существенному росту КТР, но снижают вязкость и температуру стеклования. Но для таких содержаний

легирующих добавок данные, отраженные в открытых литературных источниках, не обладают требуемой полнотой, необходимой для их качественного описания.

В формировании напряженно-деформированного состояния в оптическом волокне типа Panda и заготовках его конструктивных элементов участвуют такие свойства материалов, как вязкость, коэффициент температурного расширения, коэффициент Пуассона и модуль упругости. Зависимости этих свойств от процентного содержания легирующих добавок были получены, путем аппроксимации экспериментальных данных из литературных источников, в работах А.Н. Труфанова [116] и О.Ю. Сметанникова [117]. Эти зависимости применялись при численном моделировании.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Анализ особенностей технологического процесса изготовления анизотропного оптического волокна типа Panda выявил проблемы при производстве: нарушение прочности заготовок силовых стержней, приводящие к браку изделия, и несовершенство процедуры отбора волокна для использования в ВОГ. Обе проблемы приводят к экономическим потерям предприятия. Для решения выявленных проблем необходимо построение математических моделей оптического волокна типа Panda и заготовки его конструктивного элемента с учетом технологических остаточных напряжений.

Анализ представленных в литературе математических моделей формирования полей напряжений в анизотропных оптических волокнах показал, что большинство моделей имеют термоупругую постановку, не учитывающую закон изменения температуры, скорость охлаждения, процесс стеклования материала и релаксационные процессы, свойственные конструкциям из стеклюющихся материалов.

В большинстве исследований оптического волокна типа Panda не рассматривается влияние полимеров защитного покрытия на формирование напряженно-деформированного состояния в волокне, определяющим его оптические характеристики, или защитное покрытие учитывается, но свойства

материалов берутся в качестве констант без учета вязкоупругой природы материалов, присущей применяемым типам покрытий. С этой точки зрения при моделировании волокна Panda необходимо учитывать поведение полимеров защитного покрытия в широком диапазоне температур и зависимость их свойств от температуры.

Волокно, используемое для производства ВОГ, должно корректно работать в заявленном производителем диапазоне температур, но многие исследования проводятся при комнатной температуре или в узком диапазоне изменения. Поэтому вызывает интерес моделирование на всем эксплуатационном температурном диапазоне.

В соответствии с проведённым анализом литературы сформулирована цель исследования: разработка математических моделей термовязкоупругости анизотропного оптического волокна типа Panda и его конструктивных элементов для изучения основных закономерностей деформационного и оптического поведения изделия на этапах изготовления.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить постановку задач изготовления силовых стержней и промежуточного испытания волокна типа Panda в условиях технологической пробы с учетом особенностей технологического процесса.
2. Построить математическую модель поведения заготовки силового стержня с учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений для анализа условий разрушения на различных этапах производства.
3. Разработать методику выбора и определить критерий прочности заготовки силового стержня на основе анализа количественных значений критериальных характеристик, полученных в рамках серии численных и натуральных экспериментов на разрушение.
4. Построить математическую модель волокна Panda с учетом термомеханики полимерных материалов защитно-упрочняющего покрытия для описания эволюции технологических напряжений в условиях термосилового воздействия.

5. Выполнить комплексные исследования основных закономерностей влияния защитно-упрочняющих покрытий на эволюции напряженно-деформированного состояния и оптических характеристик волокна Panda в условиях термосилового воздействия на основе серии вычислительных экспериментов.

ГЛАВА 2. ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В главе приводится концептуальная и математическая постановка всех задач, используемых в рамках диссертационной работы с подробным описанием моделей. Объектом исследования является анизотропное оптическое одномодовое волокно типа Panda, которое представляет конструкцию из кварцевых стекол и двухслойного УФ-отверждаемого полимерного покрытия (рисунок 2.1).

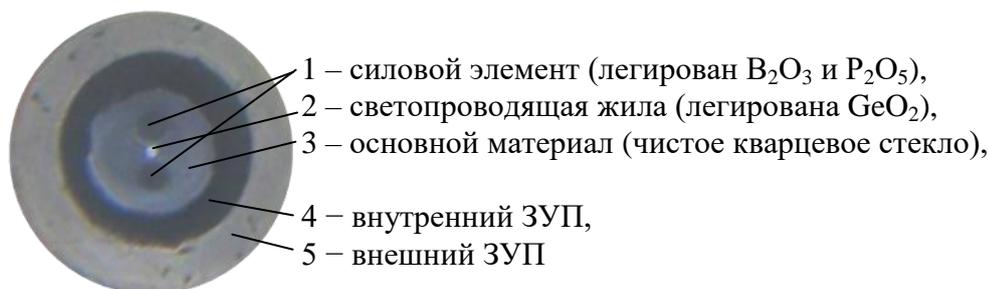


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение анизотропного оптического волокна типа Panda

2.1 Модель формирования остаточных напряжений в стеклующихся материалах

При изготовлении оптического волокна типа Panda на 1 этапе (изготовление силового стержня методом MCVD) и на 6 этапе (вытяжка оптического волокна) происходит охлаждение конструкций в диапазоне температур $[2000^{\circ}C; 20^{\circ}C]$, в процессе которого в конструкции формируются поля остаточных технологических напряжений. Этому способствует несовместность температурных деформаций и неоднородность термомеханических свойств материалов волокна, а, следовательно, пространственно-временная неоднородность стеклования материалов. Для описания поведения конструкций в таких условиях Труфановым А.Н. [113,118] была разработана математическая модель, позволяющая учесть всю историю изменения температуры, скорость охлаждения, процесс стеклования материала и релаксационные процессы, свойственные конструкциям из стеклующихся материалов.

Гипотезы:

- малые деформации (т.к. $\alpha_{SiO_2} = 5 \cdot 10^{-7} K^{-1}$);

– отсутствие в материале фазовых переходов, выделения или поглощения тепла и диссипативного тепловыделения [66].

Чтобы определить поля температур решается задача нестационарной теплопроводности (задача 1). Чтобы определить поля технологических остаточных напряжений решается краевая задача термомеханики (задача 2). С учетом принятых гипотез они несвязанны.

Постановка задачи нестационарной теплопроводности (задача 1)

Уравнение теплопроводности:

$$\rho(\mathbf{x})c(\mathbf{x},T)\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(\mathbf{x},T)\operatorname{grad}(T)), \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.1)$$

где $\rho(\mathbf{x})$ – плотность материала,

$c(\mathbf{x},T)$ – теплоемкость,

$\lambda(\mathbf{x},T)$ – теплопроводность.

Граничные условия:

$$-\lambda(\mathbf{x},T)\operatorname{grad}(T) \cdot \mathbf{n} = h(T) \cdot (T_c - T) + \varepsilon_s \sigma_0 (T_c^4 - T^4), \quad \mathbf{x} \in S, \quad (2.2)$$

где $h(T) \cdot (T_c - T)$ – конвективный теплоперенос,

$\varepsilon_s \sigma_0 (T_c^4 - T^4)$ – лучистый теплообмен по закону Стефана–Больцмана,

T_c – температура окружающей среды,

$h(T)$ – коэффициент теплоотдачи,

ε_s – коэффициент черноты,

σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана.

Начальные условия:

$$T(\mathbf{x},\mathbf{0}) = T_0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in V \quad (2.3)$$

Для численной реализации задачи использован метод конечных элементов [119].

Постановка краевой задачи термомеханики (задача 2)

Уравнения равновесия:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.4)$$

где $\hat{\sigma}$ – тензор напряжений,

V – расчетный объём,

\mathbf{x} – радиус-вектор произвольной точки расчетного объёма.

Геометрические соотношения:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.5)$$

где $\hat{\varepsilon}$ – тензор деформаций,

\mathbf{u} – вектор перемещений.

Граничные условия:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}, \quad \mathbf{x} \in S_u, \quad \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}, \quad \mathbf{x} \in S_\sigma \quad (2.6)$$

где S_u – граница с заданными перемещениями,

S_σ – граница с заданными нагрузками,

\mathbf{n} – нормаль к поверхности.

Определяющие соотношения

$$\hat{\sigma} = {}^4\hat{C} \cdot (\hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}_T - \hat{\varepsilon}_B), \quad (2.6)$$

где ${}^4\hat{C}$ – тензор упругих констант материала в твердом состоянии;

$\hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t)$ – тензор полных деформаций,

$\hat{\varepsilon}_B = \int_0^t \frac{\partial \hat{\varepsilon}_B}{\partial t} dt$ – тензор вязких деформаций,

где $\frac{\partial \hat{\varepsilon}_B}{\partial t} = \frac{\hat{S}}{\eta(\mathbf{x}, T)}$,

где $\eta(\mathbf{x}, T) = \eta_0(\mathbf{x}) e^{\frac{U(\mathbf{x})}{RT(\mathbf{x}, t)}}$ – вязкость материала,

где $U(\mathbf{x})$ – энергия активации,

R – универсальная газовая постоянная.

$\hat{S} = \hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) - \sigma(\mathbf{x}, t) \tilde{E}$ – девиатор тензора напряжений,

где $\sigma(\mathbf{x}, t)$ – среднее напряжение,

\hat{E} – единичный тензор.

$\hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x}, t) = \hat{E} \int_{T_0}^T \alpha(\mathbf{x}, T(\mathbf{x}, t)) dT$ – тензор температурных деформаций,

где $\alpha(\mathbf{x}, T)$ – коэффициент температурного расширения материала.

Предполагается, что в расплавленном состоянии материал ведет себя как несжимаемая жидкость. В этом случае девиатор тензора вязкой деформации равен тензору вязких деформаций.

Для численной реализации задачи использован пошаговый метод. Был построен дискретный аналог задачи по неявной схеме с шагом по времени $t=[0 \dots t_{m+1}]$, который для шага при t_m решался через итерационную процедуру с $k=1, 2, 3, \dots$

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}^{m(k)} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.7)$$

$$\hat{\varepsilon}^{m(k)} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u}^{m(k)} + (\nabla \mathbf{u}^{m(k)})^T), \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.8)$$

$$\mathbf{u}^{m(k)} = \mathbf{U}^m, \quad \mathbf{x} \in S_u, \quad \hat{\sigma}^{m(k)} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}^m, \quad \mathbf{x} \in S_\sigma \quad (2.9)$$

$$\hat{\sigma}^{m(k)} = {}^4\hat{C} \cdot (\hat{\varepsilon}^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_T^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_B^{m(k)}) \quad (2.10)$$

$$\frac{\hat{\varepsilon}_B^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_B^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} = \frac{\hat{S}^{m(k-1)}}{\eta(\mathbf{x}, T_m)} \quad (2.11)$$

$$\hat{\varepsilon}_T^m = \hat{E} \int_{T_0}^{T_m} \alpha(\mathbf{x}, T) dT \quad (2.12)$$

$$\eta(\mathbf{x}, T_m) = \eta_0(\mathbf{x}) e^{\frac{U}{RT_m}} \quad (2.13)$$

Такой метод был реализован в прикладном программном пакете ANSYS Mechanical APDL, на каждой итерации методом конечных элементов находилось решение задачи линейной термоупругости с применением модели Anand [120]:

$$\dot{\varepsilon}_B = A e^{\frac{U}{RT}} \left[\sinh \left(\xi \frac{\sigma}{s} \right) \right]^m, \dot{s} = \left\{ h_0 (|B|)^a \frac{B}{|B|} \right\} \dot{\varepsilon}_B, B = 1 - \frac{s}{s^*}, s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\varepsilon}}{A} e^{\frac{U}{RT}} \right]^n \quad (2.14)$$

При $h_0 = 0$, $m = 1$, $s = 1 = const$, $\xi \sigma \ll 1$, $A = [\eta_0 \xi]^{-1}$ она переходит в определяющие соотношения (2.6) в рамках описанной выше итерационной процедуры. Для расчета использовались $\xi = 10^{-10}$, $A = 2,3 \cdot 10^{18}$. Численное моделирование проводилось в рамках плоско-деформированного состояния с использованием четырехугольных восьмиузловых конечных элементов SOLID185 с лагранжевой аппроксимацией. Начальные условия для всех величин на первом временном шаге определяются из условия естественного, изначально ненапряженного и недеформированного состояния.

В расчете использовалась зависимость динамической вязкости от температуры и коэффициента концентрации легирующей примеси $\lg(\eta(\mu, T)) = k_1(\mu) + \frac{k_2(\mu)}{T}$, где $k_1(\mu)$ и $k_2(\mu)$ были получены численно в виде фрагментарных сплайновых интерполяций на основе результатов обработки экспериментальных данных [116].

2.2 Модель трехточечного изгиба силовых стержней

Для оценки прочности конструкции заготовки силового стержня анизотропного оптического волокна типа Panda необходимо провести численное исследование напряженно-деформированного состояния в условиях натурального эксперимента на трехточечный изгиб. В силу симметрии рассматривается четвертая часть конструкции, расчетная схема приведена на рисунке 2.2.

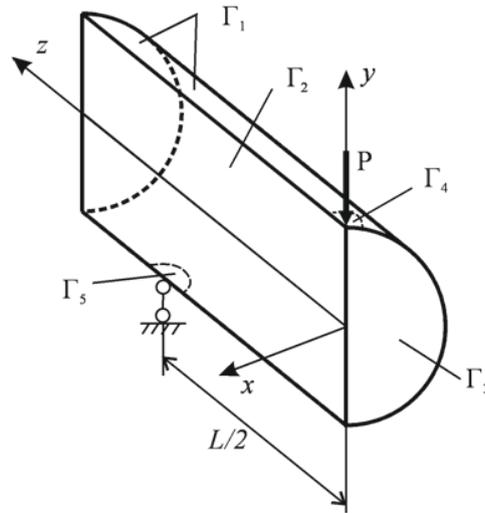


Рисунок 2.2 – Расчетная схема конструкции

Постановка задачи

Уравнения равновесия:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.14)$$

Геометрические соотношения:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) + \hat{\varepsilon}_0, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.15)$$

где $\hat{\varepsilon}_0$ – остаточные упругие деформации, полученные в результате решения задачи (2.1) – (2.13) для заготовки силового стержня и используемые в качестве начального распределения.

Определяющие соотношения

$$\hat{\sigma} = \lambda I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2G \hat{\varepsilon}, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.16)$$

где $I_1(\hat{\varepsilon})$ – первый инвариант тензора деформаций,

\hat{I} – единичный тензор,

λ – параметры Ламе,

G – модуль сдвиговой деформации.

Граничные условия:

$$\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1$$

$$u_x(0, y, z) = 0, \quad \tau_{xz}(0, y, z) = \tau_{yz}(0, y, z) = 0, \quad y, z \in \Gamma_2,$$

$$\begin{aligned}
 u_z(x, y, 0) = 0, \quad \tau_{xz}(x, y, 0) = \tau_{yz}(x, y, 0) = 0, \quad x, y \in \Gamma_3, \\
 \sigma_y(x, y, z) = -p, \quad p = P / (4S_{\Gamma_4}), \tau_{xy}(x, y, 0) = \tau_{yz}(x, y, 0) = 0, \quad x, y, z \in \Gamma_4 \\
 u_y(x, y, z) = 0, \quad \tau_{xy}(x, y, 0) = \tau_{yz}(x, y, 0) = 0, \quad x, y, z \in \Gamma_5,
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

где P – сила, при которой произошло разрушение в натурном эксперименте,
 S_{Γ_4} – площадь поверхности, найденная в натурном эксперименте путем замера отпечатков на опорах (составляет примерно 1 мм^2).

2.3 Модель технологической пробы

После вытяжки волокно подвергается различным испытаниям на проверку качества изделия, в процессе которых проверяется соответствие контрольных параметров проектным величинам. В испытания определяются область применимости полученного изделия. Для отбора волокна в ВОГ существует технологическая проба – силовая однорядная намотка волокна типа Panda в защитно-упрочняющем покрытии на алюминиевую катушку для оценки чувствительности волокна к внешним воздействиям в диапазоне эксплуатационных температур ВОГ $[-60^\circ\text{C}; +60^\circ\text{C}]$.

В условиях технологической пробы на волокно воздействуют натяжение волокна, изгиб волокна по диаметру катушки, контактное взаимодействие волокна и алюминиевой катушки, температура от -60°C до $+60^\circ\text{C}$.

В работе Труфанова А.Н. [90] были выявлены релаксационные переходы в полимерах защитных покрытий (рисунок 2.3). Внутренний первичный слой покрытия (ЗУП₁) при комнатной температуре находится в высокоэластичном релаксационном состоянии, а при температурах ниже -40°C начинает плавный переход в застеклованное состояние. В конструкции он отвечает за уменьшение влияния силовых воздействий (изгиб, поперечная сила и др.) на оптоволокно, но при низких температурах это свойство теряется, материал получает возможность передавать усилия на кварцевую часть волокна. Внешний вторичный слой покрытия (ЗУП₂) при комнатной температуре находится в застеклованном релаксационном состоянии, а при температурах выше 30°C начинает плавный

переход в высокоэластичное состояние. В конструкции он отвечает за защиту относительно мягкого первичного покрытия от механических воздействий и влияния внешней среды, но при повышенных температурах теряет жесткость. Такие свойства материалов необходимо учитывать при моделировании напряженно-деформированного состояния волокна.

В рамках решения задачи рассматривается система волокно-катушка, где одиночное волокно в виде кольца с заданным натягом и сформированными полями остаточных технологических напряжений мгновенно «надето» на катушку. Изгиб и натяг волокна при учете вязкоупругих свойств материалов защитно-упрочняющих покрытий может вызвать неравномерность распределения контактного давления. Поэтому моделирование проводилось по схеме осевой симметрии, исследовался сектор конструкции с центральным углом $0,5^\circ$ (рисунок 2.4). Модель параметризована относительно геометрических размеров конструктивных элементов и центрального угла. Температура изменялась по заданному циклу (рисунок 2.5). При моделировании была принята гипотеза, что упругие характеристики кварцевых стекол в рассматриваемом диапазоне работы ВОГ изменяются незначительно и не зависят от температуры [111].

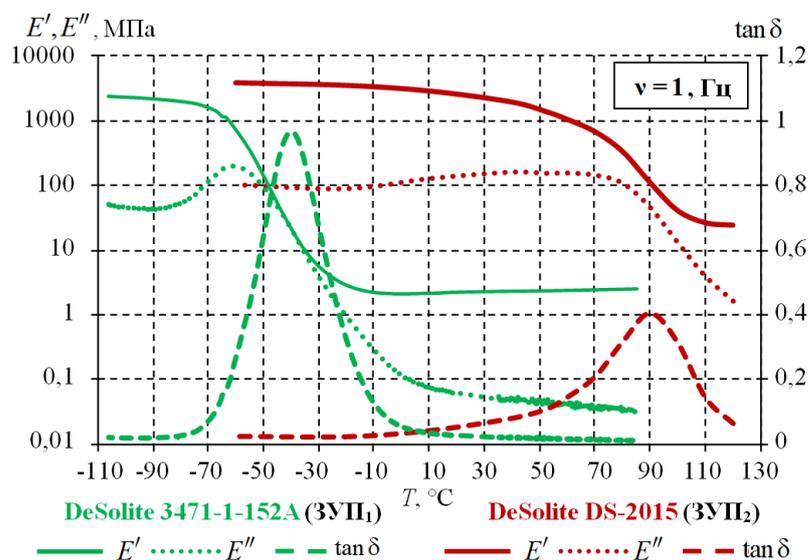


Рисунок 2.3 – Зависимость комплексного модуля и $\tan \delta$ полимеров защитных покрытий от температуры [90]

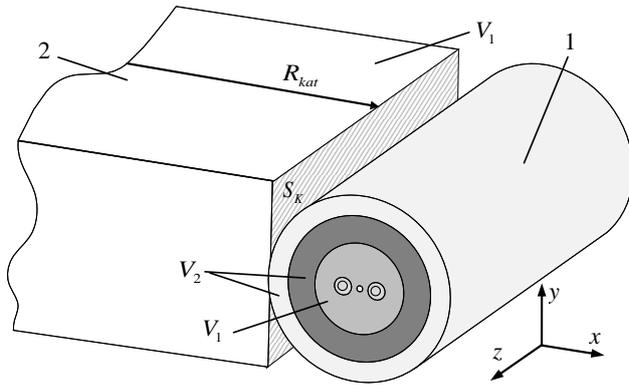


Рисунок 2.4 Объемная модель: 1 – оптическое волокно типа Panda, 2 – катушка, V_1 – объем волокна, V_2 – объем ЗУП, V_3 – объем катушки, S_K – контактная поверхность

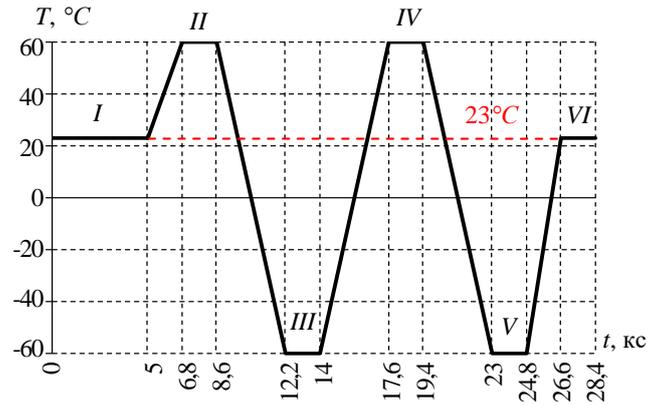


Рисунок 2.5 – Цикл изменения температуры с зонами выдержки: I: 23 °С после намотки; II: 60 °С при 1 цикле; III: -60 °С при 1 цикле; IV: 60 °С при 2 цикле; V: -60 °С при 2 цикле; VI: 23 °С после 2 цикла

Постановка задачи

Уравнения равновесия:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.18)$$

Геометрические соотношения:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) + \hat{\varepsilon}_0, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2.19)$$

где $\hat{\varepsilon}_0$ – упругие деформации, используемые в качестве начального распределения:

- для материалов волокна (стекла): $\hat{\varepsilon}_f^0 = \hat{\varepsilon}_{расм}^0 + \hat{\varepsilon}_{изг}^0 + \hat{\varepsilon}_T^0$,

- для полимеров ЗУП: $\hat{\varepsilon}_c^0 = \hat{\varepsilon}_{расм}^0 + \hat{\varepsilon}_{изг}^0$,

где $\hat{\varepsilon}_T^0$ – остаточные упругие деформации, полученные в результате решения задачи (2.1) – (2.13) для волокна типа Panda,

$$\hat{\varepsilon}_{изг}^0 = \frac{x_k}{R_{kat} + R_{зуп}} - \text{изгибные осевые деформации, которые вычисляются}$$

с использованием гипотезы плоских сечений, где x_k – расстояние от нейтрального сечения до k -го узла, $R_{kat}, R_{зуп}$ – внешние радиусы катушки и ЗУП соответственно;

$$\hat{\varepsilon}_{расм}^0 = \frac{F_T}{\sum_{i=1}^N E_i S_i} \quad - \quad \text{осевые деформации преднатяжения, которые}$$

вычисляются из условия равенства для всех узлов волокна и ЗУП, где $N=6$ – число зон с различными механическими свойствами (светопроводящая жила, 2 слоя силового стержня, кварц, ЗУП₁, ЗУП₂);

E_i, S_i – модуль Юнга и площадь i -ой зоны, F_T – сила преднатяжения.

Окончательное значение $\hat{\varepsilon}_{расм}^0$ корректируется по итогам предварительного расчета так, чтобы при начальных условиях

удовлетворялось равенство $\sum_{j=1}^{N_e} \sigma_j S_j = F_T$, где N_e – число элементов в

зоне волокна и ЗУП, σ_j, S_j – среднее осевое напряжение в j -ом элементе и его площадь соответственно.

Граничные условия:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}, \mathbf{x} \in S_u, \quad \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}, \mathbf{x} \in S_\sigma \quad (2.21)$$

Граничные условия контакта без трения между волокном и катушкой:

$$\mathbf{u}^1 \neq \mathbf{u}^2, \quad \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \quad \sigma_{n\tau}^1 \neq \sigma_{n\tau}^2, \quad \sigma_{n\tau_1} = \sigma_{n\tau_2} = \sigma_n = 0, \quad |\mathbf{u}_n^1 - \mathbf{u}_n^2| \geq 0 \quad (2.22)$$

где \mathbf{u} – вектор перемещений контактной границы,

\mathbf{u}_n – перемещения по нормали,

σ_n – напряжение по нормали к контактной границе,

$\sigma_{n\tau_1}, \sigma_{n\tau_2}$ – касательные напряжения на контактной границе,

$\sigma_{n\tau}$ – величина вектора касательных контактных напряжений,

1-2 – условные номера тел контакта.

Определяющие соотношения:

- для материалов волокна (стекла) и катушки:

$$\hat{\sigma} = \lambda I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2G\hat{\varepsilon}, \quad \mathbf{x} \in V_1 \cup V_3, \quad (2.23)$$

- для полимеров ЗУП [90]:

$$\hat{\sigma} = K\Delta\hat{I} + 2\int_0^t G(t-\tau)d(\hat{\varepsilon}(\tau) - 1/3\Delta(\tau)\hat{I}), \quad (2.24)$$

где Δ – объемная деформация,

K – модуль объемного сжатия,

t и τ – текущее и прошедшее время соответственно,

$$G(t) = G_0 \left[C_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G} C_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right] - \text{функция сдвиговой релаксации,}$$

где G_0 – мгновенный модуль сдвига,

C_i^G – материальные константы, найденные из эксперимента,

n_G – количество членов экспоненциального ряда,

$$\tau_i^G(T) = \frac{\tau_i(T_b)}{a_T(T, T_b)} - \text{времена релаксации,}$$

где $\lg a_T = \frac{C_1^T(T - T_b)}{C_2^T + (T - T_b)}$ – температурно-временная аналогия по

уравнению Вильямса-Ланделла-Ферри [121] для учета влияния температуры на свойства материалов ЗУП, где C_1^T, C_2^T – материальные константы, T_b – температура приведения.

Параметры уравнения Вильямса-Ланделла-Ферри для внутреннего покрытия: $C_1^T = 20,036$, $C_2^T = 32,666$, $T_b = -70^\circ\text{C}$, $n_G = 18$. Параметры уравнения Вильямса-Ланделла-Ферри для внешнего покрытия: $C_1^T = 40242,2827$, $C_2^T = 267448,888$, $T_b = 0^\circ\text{C}$, $n_G = 60$. Материальные константы C_i^G приведены на рисунке 2.6. Отыскание параметров моделей было проведено методом Нелдера-Мида на основании данных натуральных экспериментов.

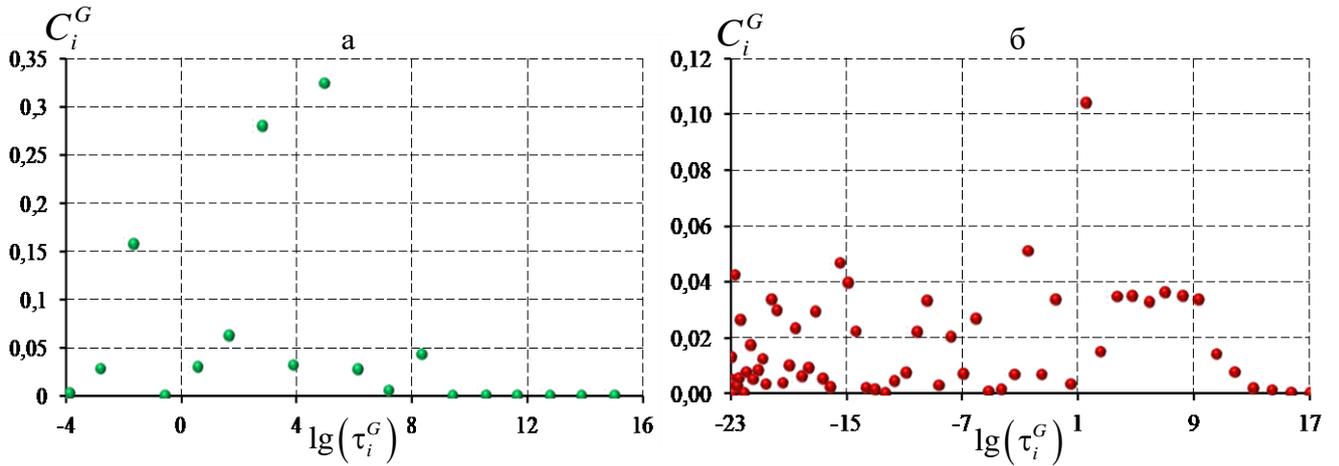


Рисунок 2.6 – Материальные константы: а – внутренний ЗУП, б – внешний ЗУП

Зная напряженно-деформированное состояние можно определить оптические характеристики волокна. Будем рассматривать [50, 61, 122]:

- изменение показателя преломления (приращение за счет изменения НДС в волокне):

$$\Delta n_x = -C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y - \sigma_z), \quad \Delta n_y = -C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x - \sigma_z) \quad (2.25)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненты тензора напряжений,

$C_1 = -6,5e-13 \text{ Па}^{-1}$, $C_2 = -4,22e-12 \text{ Па}^{-1}$ – коэффициенты фотоупругости;

- материальное двулучепреломление:

$$B_i = \Delta n_x - \Delta n_y \quad (2.26)$$

- модовое двулучепреломление:

$$B = (C_1 - C_2) \int_{S_c} (\sigma_x - \sigma_y) |E^*|^2 dS_c / \int_{S_c} |E^*|^2 dS_c \quad (2.27)$$

где E^* – распределение интенсивности основной моды света по поперечному сечению волновода (использовано равномерное распределение $E(r, \phi, V) = E_0$),

S_c – площадь поперечного сечения жилы.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Сделана общая математическая постановка задач:

- формирования остаточных технологических напряжений в стеклюющихся материалах, применяемая как для заготовок силовых стержней, так и для оптического волокна типа Panda;
- трехточечного изгиба заготовки силовых стержней с учетом остаточных технологических напряжений;
- технологической пробы для оптического волокна типа Panda в полимерном защитно-упрочняющем покрытии с учетом остаточных технологических напряжений, натяжения, изгиба, контактного взаимодействия волокно-катушка, температуры от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$, а также вязкоупругих эффектов, связанных с релаксационными переходами в полимерах ЗУП в данном температурном диапазоне.

Сформулированы основные гипотезы применимости математических моделей, описанных в главе.

Рассмотрены свойства полимерных материалов ЗУП и выбрана вязкоупругая модель для описания их поведения с использованием обобщенной модели Максвелла с описанием функций релаксации в виде суммы экспонент и температурно-временной аналогии по уравнению Вильямса-Ланделла-Ферри.

ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ СИЛОВЫХ СТЕРЖНЕЙ

Глава посвящена комплексному численно-экспериментальному исследованию конструкционной прочности заготовок силовых стержней волокна типа Panda, которые разрушаются в процессе изготовления и эксплуатации в технологическом процессе производства волокна, чем вызывают экономические потери предприятия-изготовителя. Под конструкционной прочностью будем понимать прочность, которая обеспечивает работоспособность изделия в заданных условиях эксплуатации [124]. В реальных условиях изделия находятся в сложнапряженном состоянии, поэтому критерий прочности, определенный для конкретной конструкции, позволяет учесть основные факторы, влияющие на прочность: технологические остаточные напряжения; качество обработки поверхности; неоднородность легирования; разброс свойств материалов; наличие поверхностных и внутренних дефектов; масштабный фактор и т.д. Кроме этого на работоспособность конструкции из стекла могут оказывать влияние уровень и вид внешней нагрузки, геометрия изделия, температура и агрессивность среды эксплуатации, которые могут значительно снизить прочность изделия.

До сих пор не существует общей теории, которая бы объясняла влияние разных параметров на прочность стекла. Необходимость переноса параметров разрушения с образцов на изделия является недостатком известных теорий разрушения [125]. Поэтому актуальной является разработка критериев прочности конкретных конструкций на основе сопоставления данных математического моделирования и натуральных экспериментов на разрушение. В этом случае можно принять во внимание факторы, не поддающиеся учету, например, недостаточно точную информацию по количественному составу многокомпонентных стекол или зависимость термомеханических и прочностных характеристик материалов от неоднородного легирования.

3.1 Объект исследования

Заготовка силового стержня – это гетерогенная конструкция из трех слоев стекол, два из которых могут быть неоднородно легированы по радиусу

оксидами, увеличивающими коэффициент температурного расширения материалов. Главная функция такой конструкции заключается в создании специфического поля технологических остаточных напряжений при вытяжке оптического волокна типа Panda для формирования разницы показателей преломления в светопроводящей жиле. Процесс изготовления был рассмотрен в разделе 1.1. Схема поперечного сечения приведена на рисунке 3.1.

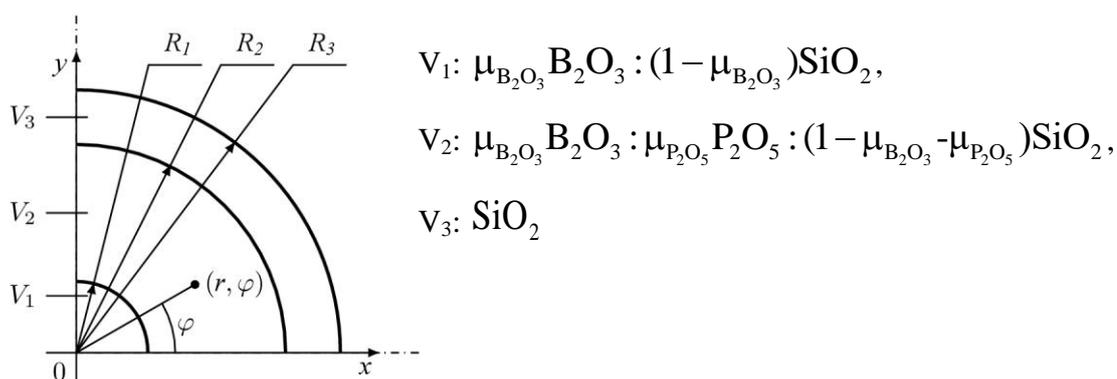


Рисунок 3.1 – Схема поперечного сечения заготовки силового стержня

Химический состав стекла влияет на его свойства [80,109], поэтому они коррелируют со степенью легирования. Например, измерение показателя преломления позволяет определять как границы материалов в конструкции, так и их профили легирования, которые можно описать аппроксимирующими функциональными зависимостями. B_2O_3 и P_2O_5 увеличивают КТР, снижают температуру стеклования и вязкость кварцевого стекла. [80,108]. Чем выше степень легирования, тем большую температурную деформацию могут обеспечить стержни в волокне при изготовлении. Однако высокие концентрации легирующих оксидов могут приводить к разрушению заготовок силовых элементов в процессе их изготовления и эксплуатации.

Было показано [126], что концентрация легирующих добавок оказывает значительное влияние на технологические остаточные напряжения, сформированные после охлаждения заготовки силового стержня. Высокий уровень напряжений, полученный в численном расчете, коррелирует с производственным опытом по разрушению заготовок. В большинстве случаев происходит полное разрушение на мелкие фрагменты, но иногда сетка трещин

локализуется в легированной сердцевине (рисунок 3.2). В работах [125, 127] такой механизм описывают как разрушение стекол под действием остаточных напряжений.

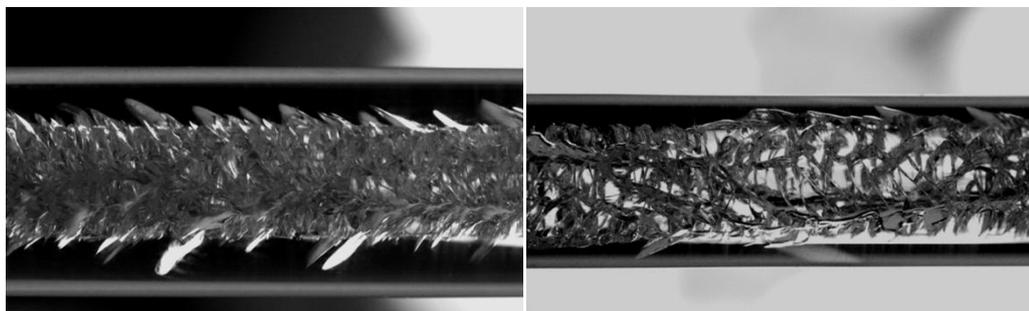


Рисунок 3.2 – Картины разрушения легированного части заготовки силового стержня

Поэтому перед технологами стоит задача конструирования такого силового стержня, чтобы подобрать зависимость концентрации легирующих оксидов от радиуса, обеспечивающую наибольшую температурную деформацию стержня при вытяжке волокна, не нарушая прочности на протяжении всего процесса изготовления. Для решения такой задачи необходимо знать критерий прочности, но прочность стекол также зависит от его состава и еще огромного количества факторов, что не позволяет применить приведенные в доступной литературе данные для проектирования конструкции силового стержня с достаточной достоверностью. Можно делать лишь прикидочные расчеты.

3.2 Натурные эксперименты по разрушению стержней

Для оценки прочности конструкции заготовки силового стержня были проведены натурные испытания на экспериментальной установке Instron 8801 в ЦКП «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ. Была выбрана схема трехточечного изгиба с предельной нагрузкой 5кН (рисунок 3.3).

Будем называть испытываемые конструкции стержней образцами. Для нагружения и опоры образцов была применена оснастка в виде металлических цилиндров, покрытых уплотнительной лентой. Отпечаток на



Рисунок 3.3 – Испытание заготовки силового стержня

уплотнительной ленте позволил оценить площадь контактной поверхности с образцом для учета в численном моделировании. Под образцом находился датчик перемещения, измеряющий прогиб.

Была выполнена серия из 31 натурального эксперимента с двумя видами стержней: стержень из чистого кварцевого стекла (рисунок 3.4) – 4 шт, силовой стержень с легированной сердцевиной (рисунки 3.1 и 3.3) – 27 шт.

Стержни имели разную геометрию: длину, внешний диаметр и диаметр легированной сердцевины. В таблице 1 сведены геометрические размеры образцов, расстояние между опорами и полученные результаты эксперимента, где R'_3 – приведенный к максимальному диаметр образцов, R'_2 – приведенный к максимальному диаметр легирования образцов, L – длина образцов, $L_{\text{базы}}$ – расстояние между опорами в эксперименте, F – сила разрушения, U_3 – прогиб в эксперименте. Образцы № 28-31 соответствуют стержням из чистого кварцевого стекла. Диаметр внутреннего слоя, легированного оксидом бора, приведенный к максимальному внешнему диаметру силового стержня, принимался для всех образцов силовых стержней одинаковым, $R'_1 = 0,18$. Сила нагружения в эксперименте росла линейно до разрушения образца со скоростью 0,1 мм/мин кроме образца № 9 (0,01 мм/мин). Исходя из предоставленного количества образцов, были выбраны четыре базы для испытания: 45, 75, 90 и 125 мм. Различные геометрические размеры и расстояние между опорами создавали разные напряженные состояния в образцах в момент разрушения, это позволило определить критерий прочности, характеризующий именно конструкцию.

Для каждого испытания были выведены зависимости прогиба от силы нагружения, характерный график приведен на рисунке 3.4, построены линейные аппроксимации для обработки результатов. Все образцы были доведены до разрушения. Силовые стержни разрушались взрывообразно и разлетались на мелкие кусочки (рисунок 3.5а). Образцы стержней из кварцевого стекла имели совершенно другой характер разрушения с образованием трещин из наиболее растянутой зоны с образованием нескольких крупных фрагментов (рисунок 3.5б).

Таблица 3.1 – Геометрические параметры и результаты эксперимента

| № образца | R'_3 | R'_2 | L , мм | $L_{\text{базы}}$, мм | F , Н | U_3 , мм |
|-----------|--------|--------|----------|------------------------|---------|------------|
| 1 | 0,666 | 0,996 | 122 | 45 | 561,9 | 0,180485 |
| 2 | 0,664 | 0,987 | 98 | 45 | 523,7 | 0,174815 |
| 3 | 0,665 | 0,990 | 98 | 45 | 532,3 | 0,188465 |
| 4 | 0,665 | 0,983 | 111 | 45 | 502,8 | 0,16017 |
| 5 | 0,658 | 0,996 | 114 | 45 | 979,5 | 0,315911 |
| 6 | 0,657 | 0,996 | 114 | 45 | 800,0 | 0,283995 |
| 7 | 0,667 | 1,000 | 120 | 46 | 565,9 | 0,182634 |
| 8 | 0,664 | 0,995 | 110 | 47 | 509,5 | 0,185262 |
| 9 | 0,669 | 0,991 | 115 | 73,1 | 315,0 | 0,417077 |
| 10 | 0,654 | 0,991 | 112 | 74 | 628,2 | 0,814777 |
| 11 | 0,654 | 0,991 | 122 | 74 | 662,0 | 0,890842 |
| 12 | 0,664 | 0,989 | 103 | 74 | 280,5 | 0,456419 |
| 13 | 0,664 | 0,987 | 119 | 75 | 291,2 | 0,420497 |
| 14 | 0,665 | 0,987 | 116 | 75 | 326,3 | 0,42402 |
| 15 | 0,665 | 0,994 | 124 | 75 | 297,5 | 0,399496 |
| 16 | 0,666 | 0,998 | 140 | 75 | 299,7 | 0,433736 |
| 17 | 0,664 | 0,981 | 167 | 75 | 294,8 | 0,423072 |
| 18 | 1,000 | 0,996 | 125 | 87 | 1151,2 | 0,451611 |
| 19 | 0,665 | 0,995 | 123 | 90 | 263,9 | 0,611096 |
| 20 | 0,653 | 0,979 | 131 | 90 | 247,1 | 0,615762 |
| 21 | 0,654 | 0,984 | 137 | 90 | 241,4 | 0,598743 |
| 22 | 0,665 | 0,992 | 190 | 90 | 278,5 | 0,656764 |
| 23 | 0,663 | 0,992 | 190 | 90 | 412,9 | 1,05472 |
| 24 | 0,665 | 0,983 | 245 | 125 | 172,8 | 1,068603 |
| 25 | 0,664 | 0,983 | 244 | 125 | 291,9 | 1,71029 |
| 26 | 0,667 | 0,991 | 172 | 126 | 186,2 | 1,104311 |
| 27 | 0,664 | 0,984 | 140 | 126,7 | 186,6 | 1,110467 |
| 28 | 0,685 | – | 100 | 45 | 342,2 | 0,107429 |
| 29 | 0,685 | – | 100 | 45 | 271,9 | 0,083413 |
| 30 | 0,684 | – | 100 | 75 | 155,4 | 0,188224 |
| 31 | 0,666 | – | 100 | 75 | 207,0 | 0,271728 |

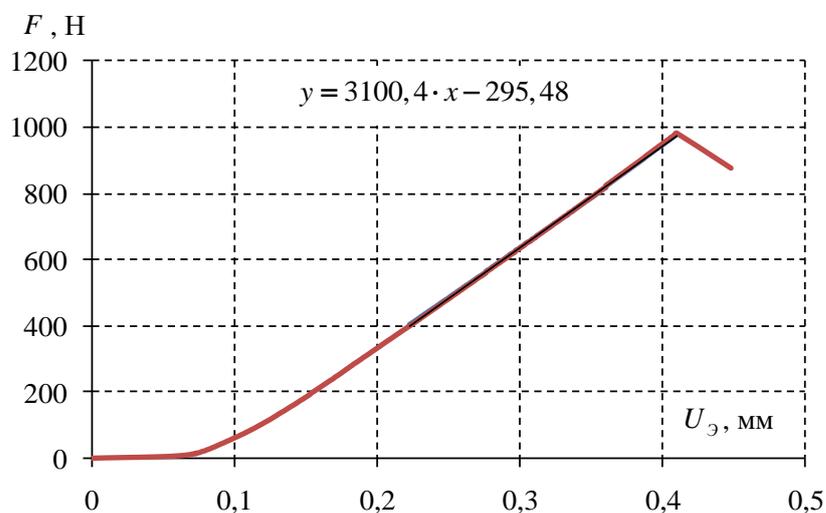


Рисунок 3.4 – Зависимость прогиба от силы нагружения, на примере образца № 5

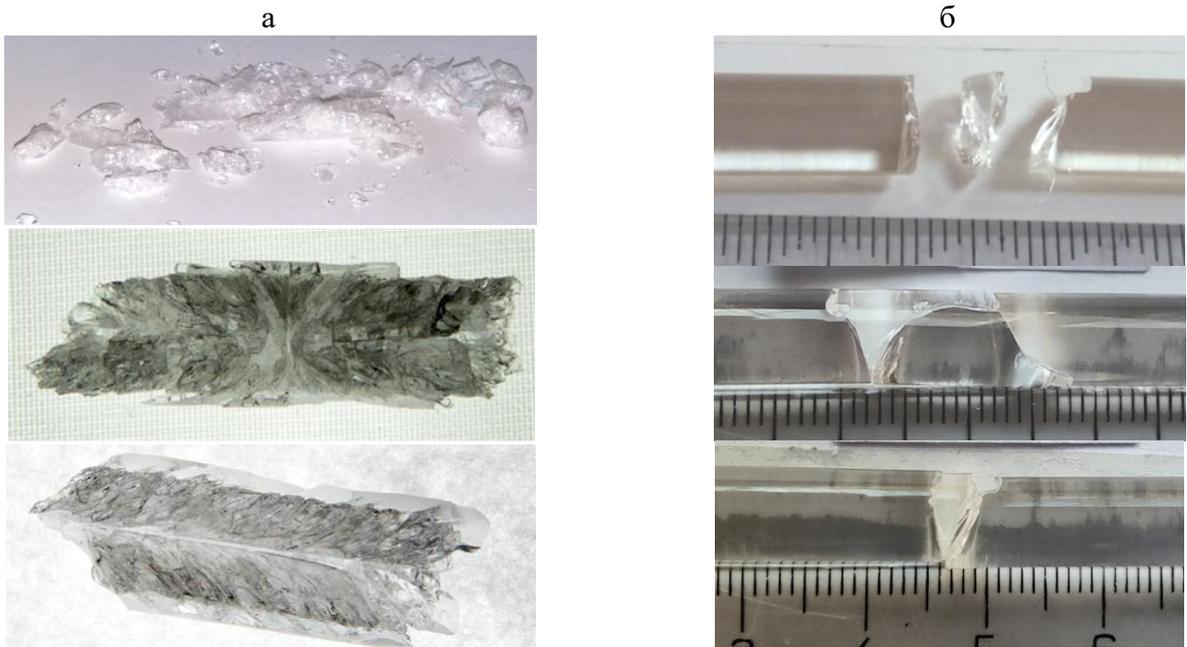


Рисунок 3.5 – Разрушение образцов: а – силовые стержни, б – стержень из кварцевого стекла

На рисунке 3.6 сведены обработанные результаты всех экспериментов, за исключением образца № 18, который не был подвержен стравливанию слоев чистого кварцевого стекла и выдержал большую нагрузку.

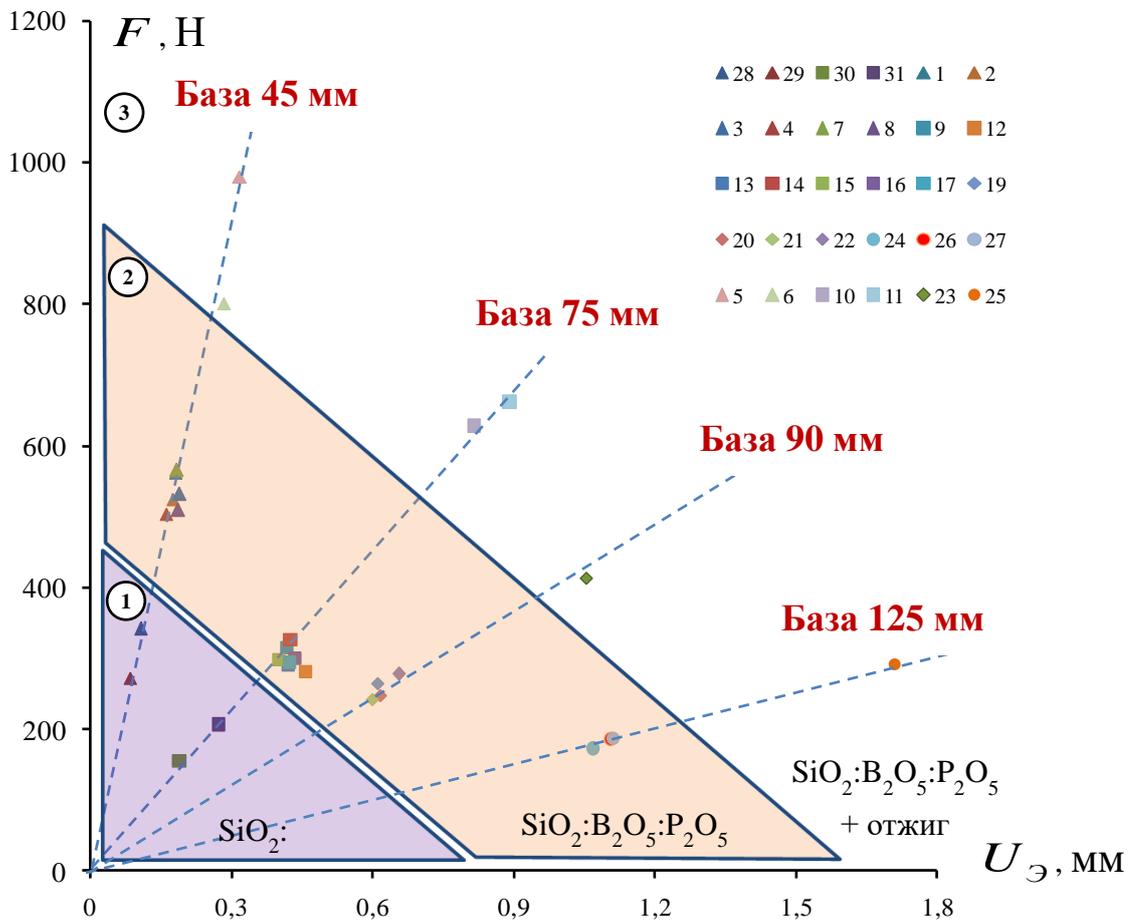


Рисунок 3.6 – Результаты обработки натуральных экспериментов

Анализ результатов диаграммы на рисунке 3.6 позволил нам разделить их на три группы с похожим поведением:

- 1 группа – это стрежни из чистого кварцевого стекла, они имеют самую низкую прочность (4 шт.);
- 2 группа – это силовые стержни, они примерно вдвое прочнее образцов из 1 группы (21 шт.);
- 3 группа – это силовые стержни, которые оказались примерно на 60% прочнее остальных. Было установлено, что в технологический цикл изготовления этих стержней был включен высокотемпературный отжиг (6 шт.).

3.3 Численные эксперименты по разрушению силовых стержней

Для математического моделирования натурного эксперимента на трехточечный изгиб был разработан алгоритм, представленный на рисунке 3.7. Для расчетов используется прикладной программный пакет ANSYS Mechanical APDL. В первую очередь определяются поля технологических остаточных напряжений в модели в один слой элементов (обобщенное плоско-деформированное состояние). Постановка задачи приведена в разделе 2.1. Далее создается трехмерная модель с сохранением дискретизации по сечению силового стержня путем вытягивания конечно-элементной сетки на половину длины силового стержня. Из модели технологических остаточных напряжений выгружается поле упругих деформаций и переносится на трехмерную модель с использованием функции INISTATE в качестве начального поля деформаций. В трехмерной модели создаются условия трехточечного изгиба (из эксперимента берутся сила

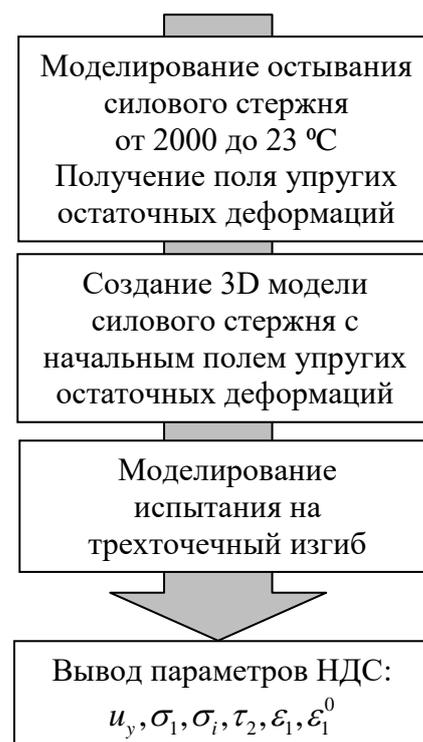


Рисунок 3.7 – Алгоритм численного моделирования

нагрузки и расстояние между опорами). Постановка задачи приведена в разделе 2.2. После решения выводятся параметры НДС, соответствующие моменту разрушения образца в натурном эксперименте, которые традиционно используются для оценки прочности: прогиб, максимальные значения первого главного напряжения, интенсивности напряжений, главного касательного напряжения и первой главной деформации. Рассмотрим подробно этапы моделирования.

3.3.1 Технологические остаточные напряжения

Технологические остаточные напряжения формируются на заключительной стадии первого этапа изготовления волокна типа Panda, когда уже готовый стеклянный стержень охлаждается от температур, соответствующих диапазону стеклования кварцевого стекла, до комнатной температуры. Легирующие оксиды значительно снижают диапазон температур стеклования материала по сравнению с чистым кварцевым стеклом, поэтому, когда внешний слой заготовки уже будет находиться в твердом состоянии, внутренняя легированная часть будет в размягченном состоянии. Т.е. в процессе охлаждения будут происходить релаксационные переходы в материалах, зависящие как от степени легирования, так и от скорости охлаждения. Постановка задачи приведена в разделе 2.1 Такое поведение описывается моделью Максвелла, обобщенной на случай сложноподвижного состояния, с использованием зависимости вязкости от температуры и степени легирования. Релаксационный переход соответствует экспоненциальному росту вязкости (разной в каждой точке из-за неравномерности легирования) при температурах, близких к температуре стеклования во время охлаждения.

Конструкция заготовки силового стержня обладает осевой симметрией кроме торцевых областей стержня. Но при моделировании эксперимента на трехточечный изгиб эти области могут быть исключены из рассмотрения, т.к. они практически не нагружены. Поэтому рассматривался случай обобщенной плоской

деформации. При расчете использовалось одномерное осесимметричное поле температур.

При решении задач необходимая степень дискретизации по времени подбиралась опытным путем со сгущением шага по времени в диапазоне температур стеклования материалов. Анализ полей температур, полученных при решении задачи нестационарной теплопроводности, позволил сделать вывод о незначительной неравномерности распределения температуры по радиусу (не более 10°C). При дальнейших исследованиях была принята гипотеза о равномерном изменении температуры по сечению заготовки силового стержня.

Дискретная модель приведена на рисунке 3.8а, использовалась регулярная конечно-элементная сетка. Все геометрические размеры были параметризованы. При решении задачи термомеханики была исследована сходимость численной процедуры по максимальному значению интенсивности напряжений, возникающей на границе чистого и легированного кварцевого стекла (рисунок 3.8б). Для моделирования, принята конечно-элементная сетка с 13788 узловыми неизвестными, расхождение между решением с 26292 узловыми неизвестными не превышает 0,5% (рисунок 3.9). Минимальный объем конечного элемента $5e4 \text{ мкм}^3$.

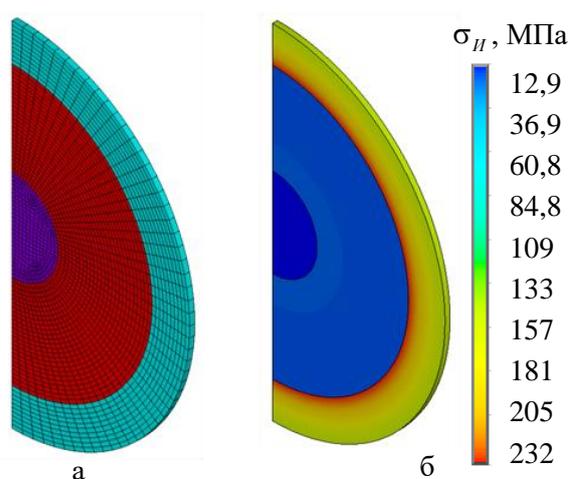


Рисунок 3.8 – Модель: а – дискретный аналог, б – характерное поле интенсивности напряжений (образец № 25)

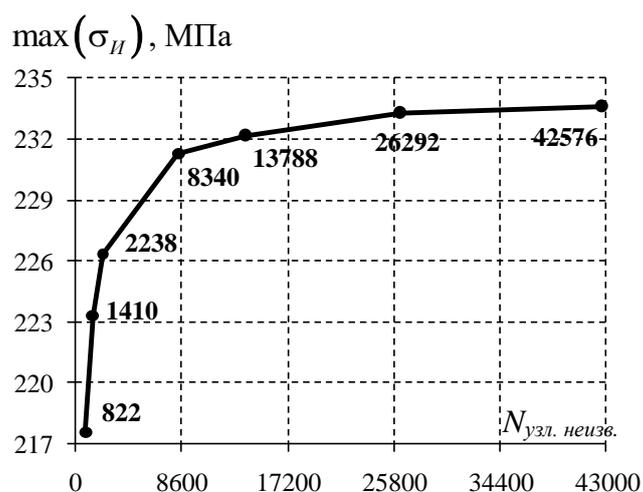


Рисунок 3.9 – Сходимость численной модели при увеличении узловых неизвестных

Ввиду необходимости моделирования процедуры трехточечного изгиба в трехмерной постановке НДС конструкции было получено на половине заготовки силового стержня, а не в рамках осесимметричной постановки. Полученное распределение будет использоваться в качестве начального при моделировании натурального испытания.

На рисунке 3.10 приведены характерные картины распределения компонент тензора остаточных напряжений по поперечному сечению силового стержня. Образец № 18 имеет оболочку из кварцевого стекла, соответствующую опорной трубке при его изготовлении. Уровень напряжений в нем очень высокий по сравнению с приводимыми в литературе пределами прочности для стекла (20 ... 70 МПа) [81,82] (рисунок 3.8а). Образец № 7 имеет обработанную оболочку из кварцевого стекла, лишние слои были стравлены плавиковой кислотой или ошлифованы абразивными материалами. Уровень напряжений в нем меньше, но все равно превышает значения из литературных источников (рисунок 3.8б). Такой уровень напряжений внутри силового стержня сдерживается внешним слоем из чистого кварцевого стекла, в котором реализуются сжимающие напряжения. Это явление способствует упрочнению конструкции, т.к. затрудняет рост трещин со стороны поверхности. Самый высокий уровень напряжений реализуется в легированной части стержня и на границе чистого и легированного кварцевого стекла, именно они могут приводить к нарушению прочности заготовки.

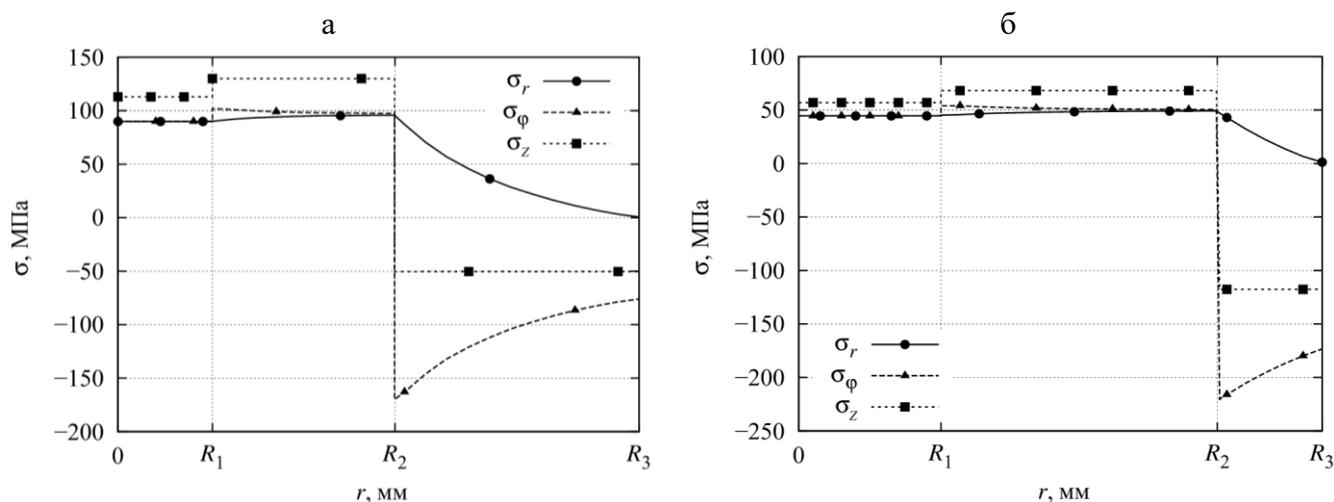


Рисунок 3.10 – Эпюры компонент тензора напряжений:
 а – образец № 18 (стержень после 1 этапа изготовления волокна Panda),
 б – образец № 7 (стержень после 4 этапа изготовления волокна Panda)

Анализ полученных решений позволил сформулировать рекомендации для производства. Для снижения количества брака в виде разрушения заготовок силовых стержней после 1 этапа рекомендуется сразу приступить к обработке поверхности и убрать слои чистого кварцевого стекла для снижения уровня остаточных напряжений в силовом стержне. Необходимо так построить технологический процесс, чтобы между этапами проходило как можно меньше времени и заготовки не лежали на складе, дожидаясь следующего этапа.

3.3.2 Математическое моделирование в условиях трехточечного изгиба

Математическое моделирование в условиях натурального эксперимента включает несколько шагов. Постановка задачи приведена в разделе 2.2. На первом шаге из однослойной дискретной модели силового стержня создается трехмерная модель путем экструдирования конечно-элементной сетки, используются четырехугольные восьмиузловые конечные элементы SOLID185. В отдельный файл для каждого конечного элемента выгружаются координаты центра (по осям x и y) и все упругие деформации, полученные при решении задачи об остаточных технологических напряжениях. Т.к. рассматривается обобщенная плоская деформация и торцевые области из рассмотрения можно исключить (как ненагруженные в условиях трехточечного изгиба), можно распространить НДС с остаточными напряжениями, полученные на 1 слое элементов, на всю длину трехмерной модели силового стержня. В трехмерной модели через функцию INISTATE (определяет данные и параметры начального состояния) путем выделения элементов по координатам центра назначаются упругие остаточные деформации. Граничные условия в задачах на данном шаге совпадают, поэтому после назначения деформаций на все элементы задача запускается на счет, во время которого алгоритмы подбирают напряжения в силовом стержне, соответствующие заданным деформациям. Таким образом, мы получаем начальное НДС в объемной модели эквивалентное остаточным технологическим напряжениям. Распределение интенсивности напряжений на рисунке 3.11 соответствует рисунку 3.8б с незначительным снижением максимального

значения, которое произошло за счет перераспределения напряжений на больший объем. Такая процедура значительно сокращает время на расчет и экономит вычислительные ресурсы по сравнению с нахождением остаточных технологических напряжений в изначально трехмерной задаче.

На следующем шаге в модели меняются граничные условия на соответствие трехточечному изгибу, задается сила нагружения, полученная в натурном эксперименте. После решения задачи мы получаем НДС, соответствующее моменту разрушения образца в натурном эксперименте.

При решении задачи была исследована сходимость численной процедуры по максимальному прогибу (рисунок 3.12). Для моделирования, принята конечно-элементная сетка с 4 924 770 узловыми неизвестными, расхождение между решением с 9 044 928 узловыми неизвестными не превышает 0,06%.

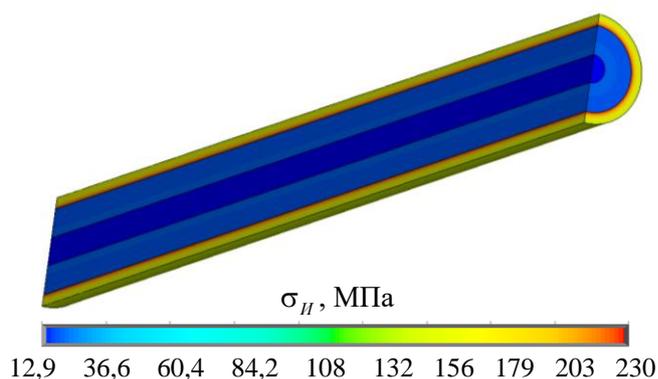


Рисунок 3.11 – Характерное поле интенсивности напряжений (образец № 25)

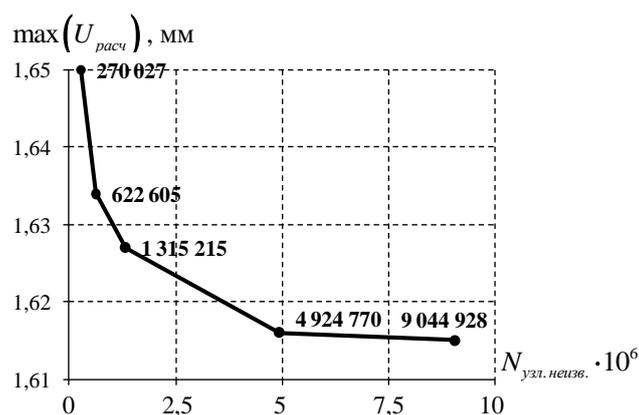


Рисунок 3.12 – Сходимость численной модели при увеличении числа узловых неизвестных

На рисунках 3.13 и 3.14 приведены характерные параметры НДС, выведенные в центральном сечении по высоте стержня. На рисунке 3.15 приведены характерные изополя первого главного напряжения и первой главной деформации. В области приложения нагружающей силы прослеживаются высокие уровни сжимающих напряжений, но они не приводят к разрушению, т.к. кварцевое стекло стойко к сжатию [80]. Максимальные значения растягивающих напряжений и первой главной деформации реализуются внутри силового стержня на границе чистого и легированного кварцевого стекла под местом приложения нагружающей силы (рисунок 3.15). Разрушение начинается с этой области.

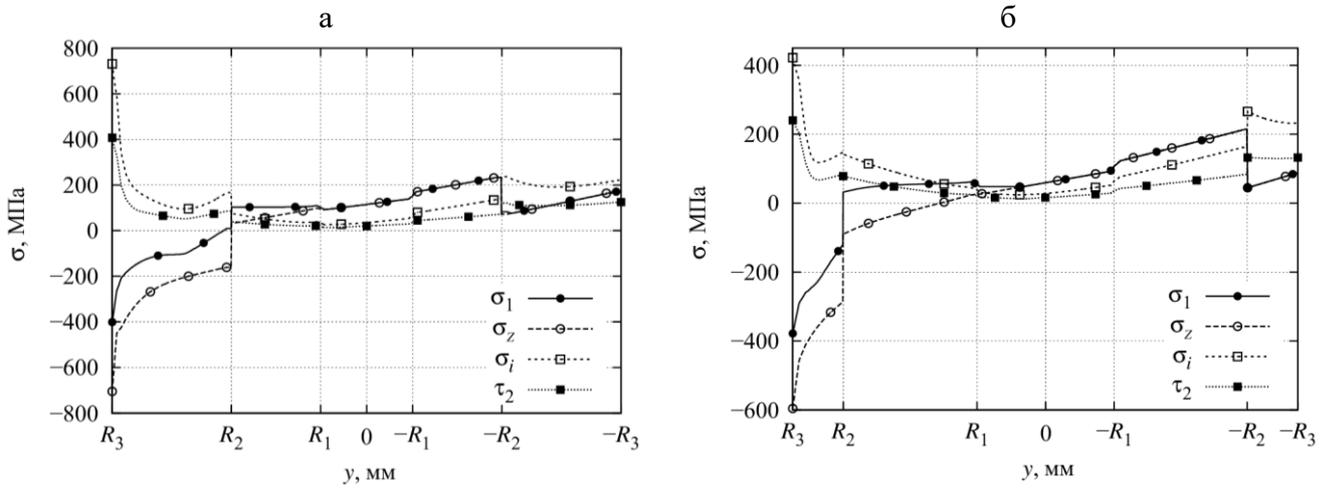
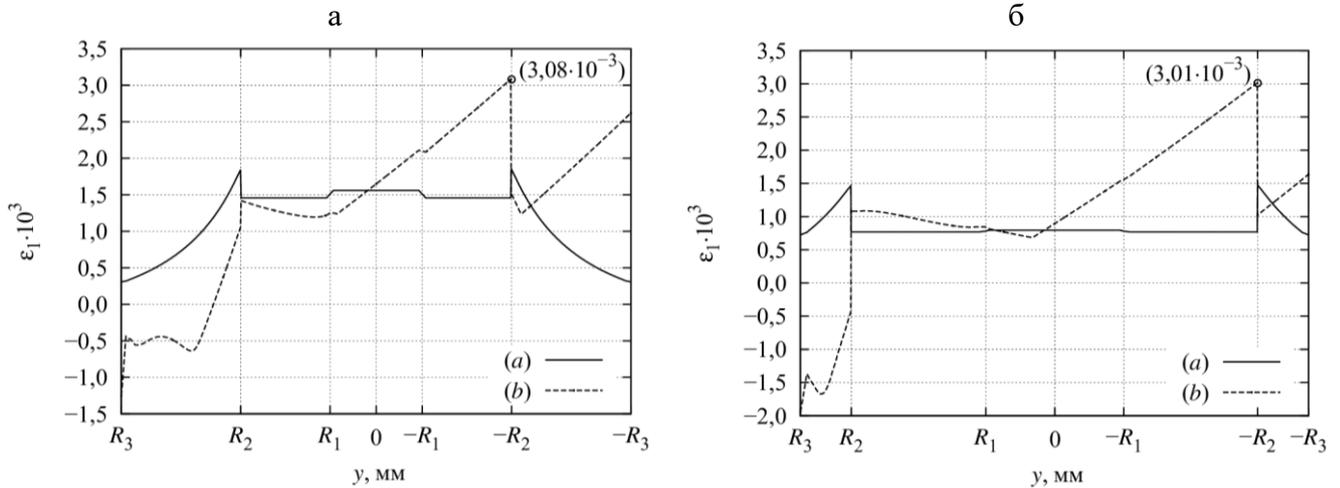


Рисунок 3.13 – Зависимости первого главного $\sigma_1(0, y, 0)$, осевого нормального $\sigma_z(0, y, 0)$, интенсивности напряжений $\sigma_{II}(0, y, 0)$ и максимального главного касательного напряжения $\tau_2(0, y, 0)$ (в центральном сечении по высоте стержня): а – образец № 18, б – образец № 7



(а) – в изготовленном стержне (соответствует остаточным напряжениям)
 (б) – в момент разрушения образца в опыте на трехточечный изгиб

Рисунок 3.14 – Эпюры первой главной деформации $\epsilon_1(0, y, 0)$ (в центральном сечении по высоте стержня): а – образец № 18, б – образец № 7

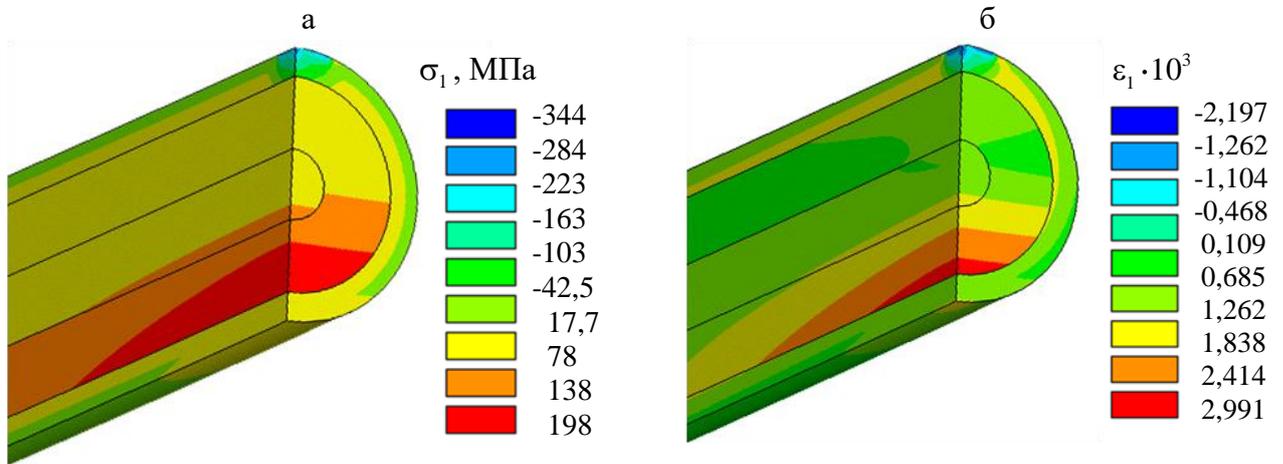


Рисунок 3.15 – Характерные изополя для образца №25: а – σ_1 , б – ϵ_1

На границе чистого и легированного кварцевого стекла под местом приложения нагружающей силы зарождается магистральная трещина, которая приводит к развитию процесса формирования системы вторичных трещин и фрагментации легированной сердцевины. Это типичный характер разрушения от действия остаточных напряжений [127]. Анализ фрагментов силовых стержней, оставшихся целыми после эксперимента (рисунок 3.5а) позволил сделать вывод, что ориентация трещин совпадает с площадками действия максимальных главных касательных напряжений, полученными из численного эксперимента.

3.4 Сравнение результатов численного и натурального эксперимента

Полученные в численном эксперименте максимальные прогибы (перемещения $u_y(0, -R_3, 0)$) и соответствующие им прогибы из натурального эксперимента приведены на рисунке 3.16. Данные структурированы относительно групп образцов, выявленных в разделе 3.2, и расстояний между опорами в натурном эксперименте. Образец № 18 имеет толстую внешнюю кварцевую оболочку, поэтому при испытании на базе 90 мм прогиб в момент разрушения получился ниже, чем в остальных силовых стержнях на этой базе, совпадение по прогибу в численном и натурном эксперименте в пределах 94,6%.

В таблице 3.2 проведено сравнение значения максимальных прогибов стержней, полученных в рамках вычислительных экспериментов $U_{расч}$, соответствующих действию разрушающего усилия из натурального эксперимента, и результатов натурального эксперимента U_3 . Расхождение не превышает 20%, за исключением данных по образцу № 12 (различие около 35%), образцам № 28 и № 29 (различие немного больше 20%). Разницу по образцу № 12 можно объяснить некорректностью задания физико-механических свойств, например, он мог иметь другую степень легирования. Образцам № 28 и № 29 соответствуют стержням из чистого кварцевого стекла. Удовлетворительное совпадение результатов подтверждает корректность задания физико-механических свойств образцов.

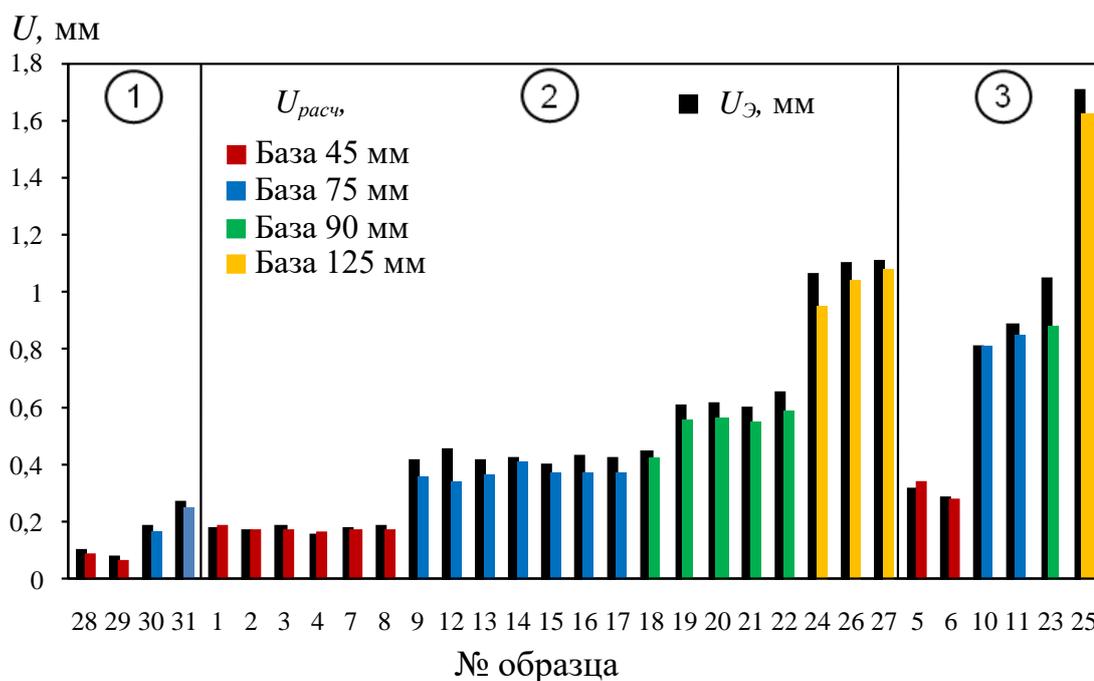


Рисунок 3.16 – Сравнение прогибов, полученных экспериментально и численно

Таблица 3.2 – Сравнение прогибов, полученных экспериментально и численно

| № образца | $U_э$, мм | $U_{расч}$, мм | $U_э / U_{расч}$, % | № образца | $U_э$, мм | $U_{расч}$, мм | $U_э / U_{расч}$, % |
|-----------|------------|-----------------|----------------------|-----------|------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 0,180485 | 0,1847 | 2,28% | 17 | 0,423072 | 0,3689 | 14,68% |
| 2 | 0,174815 | 0,1738 | 0,58% | 18 | 0,451611 | 0,4284 | 5,42% |
| 3 | 0,188465 | 0,1759 | 7,14% | 19 | 0,611096 | 0,5569 | 9,73% |
| 4 | 0,16017 | 0,1646 | 2,69% | 20 | 0,615762 | 0,5639 | 9,20% |
| 5 | 0,315911 | 0,3403 | 7,17% | 21 | 0,598743 | 0,5475 | 9,36% |
| 6 | 0,283995 | 0,2793 | 1,68% | 22 | 0,656764 | 0,5878 | 11,73% |
| 7 | 0,182634 | 0,1745 | 4,66% | 23 | 1,05472 | 0,8831 | 19,43% |
| 8 | 0,185262 | 0,1697 | 9,17% | 24 | 1,068603 | 0,9536 | 12,06% |
| 9 | 0,417077 | 0,3562 | 17,09% | 25 | 1,71029 | 1,622 | 5,44% |
| 10 | 0,814777 | 0,8122 | 0,32% | 26 | 1,104311 | 1,041 | 6,08% |
| 11 | 0,890842 | 0,8562 | 4,05% | 27 | 1,110467 | 1,079 | 2,92% |
| 12 | 0,456419 | 0,3382 | 34,96% | 28 | 0,107429 | 0,0854 | 25,80% |
| 13 | 0,420497 | 0,365 | 15,20% | 29 | 0,083413 | 0,068 | 22,67% |
| 14 | 0,42402 | 0,4062 | 4,39% | 30 | 0,188224 | 0,1664 | 13,12% |
| 15 | 0,399496 | 0,3706 | 7,80% | 31 | 0,271728 | 0,2455 | 10,68% |
| 16 | 0,433736 | 0,3714 | 16,78% | | | | |

Каждый образец в численном исследовании был проанализирован по величинам, достигающим максимальных значений в момент разрушения: первого главного напряжения σ_1 , интенсивности тензора напряжений σ_{II} , максимального главного касательного напряжения τ_2 , первой главной деформации ε_1 . В таблицах 3.3 – 3.5 приведены значения для каждой группы образцов: 1 группа –

стрержни из чистого кварцевого стекла, 2 группа – силовые стержни, 3 группа – силовые стержни после высокотемпературного отжига. Сделана статистическая обработка разбросов данных. Оценивался линейный коэффициент вариации (m), среднее линейное отклонение (размах вариации) (\bar{d}) и среднее значение (\bar{X}).

Таблица 3.3 – Расчетные значения критериальных величин на момент разрушения для 1 группы

| № образца | $\max(\sigma_I)$, МПа | $\max(\sigma_{II})$, МПа | $\max(\tau_2)$, МПа | $\max(\varepsilon_1)$ |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|
| 28 | 108,593 | 233,669 | 134,510 | 1,506E-03 |
| 29 | 89,016 | 204,184 | 116,977 | 1,234E-03 |
| 30 | 82,504 | 122,977 | 70,797 | 1,145E-03 |
| 31 | 118,769 | 169,556 | 97,418 | 1,648E-03 |
| Статистический анализ критериев | | | | |
| \bar{X} | 99,72 | 182,60 | 104,93 | 1,38E-03 |
| \bar{d} | 13,960 | 36,330 | 20,818 | 1,94E-04 |
| m | 14,00% | 19,90% | 19,84% | 14,00% |

Таблица 3.4 – Расчетные значения критериальных величин на момент разрушения для 2 группы

| № образца | $\max(\sigma_I)$, МПа | $\max(\sigma_{II})$, МПа | $\max(\tau_2)$, МПа | $\max(\varepsilon_1)$ |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 218,634 | 351,395 | 200,964 | 3,06E-03 |
| 2 | 209,844 | 320,947 | 183,635 | 2,92E-03 |
| 3 | 211,478 | 365,369 | 207,557 | 2,95E-03 |
| 4 | 209,995 | 357,646 | 204,064 | 2,92E-03 |
| 7 | 215,389 | 422,189 | 239,842 | 3,01E-03 |
| 8 | 205,834 | 374,715 | 213,199 | 2,87E-03 |
| 9 | 199,293 | 256,511 | 133,661 | 2,76E-03 |
| 12 | 189,254 | 253,930 | 134,519 | 2,61E-03 |
| 13 | 194,955 | 255,030 | 133,986 | 2,70E-03 |
| 14 | 209,603 | 261,363 | 132,913 | 2,92E-03 |
| 15 | 196,622 | 256,676 | 134,221 | 2,73E-03 |
| 16 | 196,929 | 258,170 | 134,616 | 2,73E-03 |
| 17 | 197,245 | 254,761 | 133,298 | 2,73E-03 |
| 18 | 236,405 | 730,601 | 406,865 | 3,08E-03 |
| 19 | 207,630 | 255,896 | 131,505 | 2,88E-03 |
| 20 | 202,897 | 262,208 | 135,879 | 2,83E-03 |
| 21 | 200,165 | 259,274 | 134,295 | 2,79E-03 |
| 22 | 214,814 | 260,404 | 131,783 | 2,99E-03 |
| 24 | 194,268 | 253,187 | 133,261 | 2,68E-03 |
| 26 | 204,394 | 257,187 | 133,654 | 2,84E-03 |
| 27 | 206,168 | 261,235 | 134,265 | 2,86E-03 |
| Статистический анализ критериев | | | | |
| \bar{X} | 205,801 | 310,890 | 167,999 | 2,85E-03 |
| \bar{d} | 7,808 | 71,108 | 45,727 | 1,06E-04 |
| m | 3,79% | 22,87% | 27,22% | 3,73% |

Таблица 3.5 – Расчетные значения критериальных величин на момент разрушения для 3 группы

| № образца | $\max(\sigma_1)$, МПа | $\max(\sigma_{II})$, МПа | $\max(\tau_2)$, МПа | $\max(\varepsilon_1)$ |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|
| 5 | 341,642 | 341,641 | 721,675 | 413,287 |
| 6 | 292,791 | 292,790 | 564,477 | 323,329 |
| 10 | 350,997 | 350,996 | 435,908 | 251,485 |
| 11 | 367,154 | 367,154 | 463,924 | 267,602 |
| 23 | 279,642 | 279,642 | 304,517 | 175,482 |
| 25 | 279,844 | 279,844 | 304,849 | 174,010 |
| Статистический анализ критериев | | | | |
| \bar{X} | 318,678 | 465,892 | 267,532 | 4,60E-03 |
| \bar{d} | 34,586 | 118,123 | 67,207 | 5,31E-04 |
| m | 10,85% | 25,35% | 25,12% | 11,55% |

Уровень σ_{II} и τ_2 в образце № 18 (выделен серым цветом, таблица 3.4) значительно выше, чем в других. Это можно объяснить тем, что в стержне, имеющем толстую кварцевую оболочку, реализуется более высокий уровень напряжений, который снижается при стравливании слоев кварцевого стекла. Но σ_1 и ε_1 имеют средний уровень. Поэтому из рассмотрения его не будем исключать.

Перед нами стояла задача оценить критерий прочности конструкции силового стержня, поэтому будем рассматривать только 2 группу образцов, которые массово производятся для использования в технологическом процессе производства оптического волокна типа Panda. Согласно данным таблицы 3.4 наименьший коэффициент вариации имеет первая главная деформация. На рисунке 3.14 показано, что максимальное значение находится на границе чистого и легированного кварцевого стекла, как раз в зоне начала разрушения. Поэтому для заготовок силовых стержней (2 группа) в качестве оценки конструкционной прочности изделия следует выбрать критерий максимальных главных деформаций, величина которого составляет $\varepsilon_{1кр} = (2,85 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$ на основе 21 испытания. Это значение можно использовать для проектирования и постановки задачи оптимизации с подбором профиля легирования, обеспечивающего максимальные температурные деформации в волокне и сохраняющем прочность заготовки силового стержня.

3.4 Моделирование высокотемпературного отжига образцов

Технологический цикл изготовления силовых стержней из 3 группы включал высокотемпературный отжиг. Поэтому было сделано предположение, что увеличение прочности таких стержней связано с релаксационными процессами при высокотемпературном отжиге. Математическая модель, приведенная в разделе 2.1, позволяет моделировать отжиг. В работе [128] подробно обсуждался вопрос отжига для подобных цилиндрических стержней, было показано снижение уровня напряжений в связи с релаксацией напряжений, связанной с вязкими деформациями в диапазоне температур стеклования. Поэтому для стержней из 3 группы в алгоритм моделирования (рисунок 3.7) был включен этап отжига при температуре $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ по термоциклу, приведенному на рисунке 3.17.

Моделирование отжига привело к снижению уровня технологических остаточных напряжений почти на 20%. По результатам моделирования трехточечного изгиба в таблицу 3.6

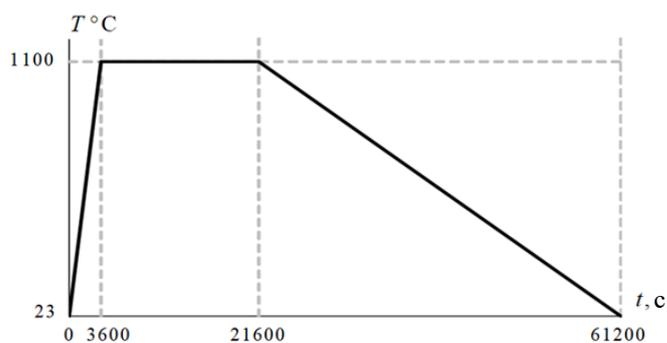


Рисунок 3.17 – Цикл изменения температуры при моделировании отжига

были сведены величины, достигающие максимальных значений в момент разрушения: первого главного напряжения σ_1 , интенсивности тензора напряжений σ_{II} , максимального главного касательного напряжения τ_2 , первой главной деформации ε_1 .

Включение отжига в процесс формирования технологических остаточных напряжений при моделировании испытания на трехточечный изгиб привело к снижению разбросов данных по интенсивности напряжений σ_{II} и главным касательным напряжениям τ_2 . А разброс первого главного напряжения σ_1 и первой главной деформации ε_1 наоборот увеличились. Для 2 группы стержней был выбран критерий максимальных главных деформаций, а после отжига разброс этой величины для 3 группы увеличился. Поэтому можно сделать вывод,

что механизм упрочнения стержней из 3 группы не связан с выдвинутым предположением об увеличении прочности из-за релаксации напряжений во время отжига.

Таблица 3.6 – Расчетные значения критериальных величин на момент разрушения для 3 группы после моделирования высокотемпературного отжига

| № образца | $\max(\sigma_1)$, МПа | $\max(\sigma_{II})$, МПа | $\max(\tau_2)$, МПа | $\max(\varepsilon_1)$ |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|
| 5 | 325,000 | 529,000 | 305,000 | 4,72E-03 |
| 6 | 267,394 | 411,162 | 236,390 | 3,84E-03 |
| 10 | 336,535 | 405,262 | 232,736 | 4,92E-03 |
| 11 | 351,932 | 429,639 | 246,987 | 5,15E-03 |
| 23 | 265,000 | 298,000 | 172,000 | 3,79E-03 |
| 25 | 262,619 | 297,670 | 171,797 | 3,75E-03 |
| Статистический анализ критериев | | | | |
| \bar{X} | 301,413 | 395,122 | 227,485 | 4,36E-03 |
| \bar{d} | 36,409 | 64,858 | 37,058 | 0,001 |
| m | 12,08% | 16,41% | 16,29% | 13,05% |

Для объяснения упрочнения отоженных силовых стержней была выдвинута гипотеза о появлении небольшого количества кристаллических структур в слое легированного материала во время отжига. У кварцевого стекла есть несколько полиморфных состояний: кварцевое стекло, кристобалит, тримидит и другие. В литературе отмечаются случаи появления кристаллизации в кварцевых стеклах с похожими составами, которые происходят при их термической обработке [129,130]. Свойства кристобалита значительно отличаются от свойств чистого кварцевого стекла [80]. КТР кристаллической фазы на порядок больше соответствующей характеристики аморфного материала [129,131]. Таким образом, даже небольшая степень кристалличности может привести к существенному перераспределению НДС. Частичная кристаллизация также существенно влияет на прочность стекла. Наличие небольшого процента кристобалита в общем объеме стекла приводит к увеличению прочности практически вдвое [132].

Построенная математическая модель не позволяет учесть процесс кристаллизации кварцевого стекла и его влияние на НДС всей конструкции. Такие

микроструктурные изменения материала требует дополнительных исследований и построения новых математических моделей.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Выполнено комплексное численно-экспериментальное исследование конструкционной прочности заготовок силовых стержней волокна типа Panda. В ЦКП «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ проведены натурные эксперименты по исследованию прочности заготовок силовых стержней, которые испытывались по схеме трехточечного изгиба до полного разрушения с фиксацией силы разрушения и прогиба стержня. Разрушение всех легированных стержней носило взрывообразный характер с разлетом на мелкие фрагменты. Для сравнения характера разрушения были также испытаны стержни из чистого кварцевого стекла.

Разработан алгоритм численного моделирования, повторяющего условия натурального эксперимента, необходимого для выявления условий нарушения прочности при изготовлении заготовок силовых стержней. Алгоритм включает несколько последовательных этапов: определение технологических остаточных напряжений, построение трехмерной модели силового стержня, моделирование трехточечного изгиба. Поля остаточных технологических напряжений принимаются в качестве начального распределения для силового стержня при действии разрушающей нагрузки в условиях испытания на трехточечный изгиб.

В численном эксперименте определены опасные зоны на границе легированного и чистого кварцевого стекла, в которых может наблюдаться потеря прочности. Для заготовок силовых стержней (2 группа) в качестве оценки конструкционной прочности изделия следует выбрать критерий максимальных главных деформаций, величина которого составляет $\varepsilon_{1кр} = (2,85 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$ на основе 21 испытания.

Для заготовок силовых стержней из 3 группы проведено моделирование высокотемпературного отжига на стадии определения технологических

остаточных напряжений, которое привело к увеличению разброса максимальных главных деформаций в стержнях. Выбранный критерий прочности для 2 группы не применим к 3 группе стержней, т.к. для нее требуется уточнение математической модели с учетом микроструктурных изменений стекол с разным легированием после высокотемпературного отжига.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АНИЗОТРОПНОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЫ

На 7 этапе производства оптического волокна типа Panda проводят исследование качества и определяют область применимости полученного изделия. Одним из промежуточных испытаний является технологическая проба – силовая однорядная намотка волокна типа Panda в защитно-упрочняющем покрытии на алюминиевую катушку для оценки чувствительности волокна к внешним воздействиям в диапазоне эксплуатационных температур ВОГ $[-60^{\circ}\text{C}; +60^{\circ}\text{C}]$.

Для математического моделирования технологической пробы был разработан алгоритм, представленный на рисунке 4.1. Для расчетов используется прикладной программный пакет ANSYS Mechanical APDL. В первую очередь определяются поля технологических остаточных напряжений в модели без защитных покрытий в один слой элементов (обобщенное плоско-деформированное состояние). Постановка задачи приведена в разделе 2.1. Далее создается дискретная модель поперечного сечения технологической пробы с сохранением конечно-элементного разбиения кварцевой части волокна (волокно с защитными покрытиями и катушка). Из поперечного сечения путем поворота по радиусу катушки на $0,5^{\circ}$ создается трехмерная модель сектора одного витка волокна намотанного на катушку. В трехмерной модели с использованием функции INISTATE задается поле начальных деформаций. В кварцевой части волокна начальное поле складывается из технологических остаточных деформаций, деформаций от изгиба и натяжения волокна, а в покрытиях волокна – из



Рисунок 4.1 – Алгоритм численного моделирования

деформаций от изгиба и натяжения. В модели задаются вязкоупругие свойства материалов, термоцикл и все параметры и условия, необходимые для исследования. Постановка задачи приведена в разделе 2.3. После решения выводятся параметры НДС и оптические характеристики в условиях термоцикла. На рисунке 4.2 описаны возможности математической модели технологической пробы.



Рисунок 4.2 – Возможности математической модели технологической пробы

4.1 Технологические остаточные напряжения в волокне типа Panda

Технологические остаточные напряжения формируются во время вытяжки волокна перед нанесением защитных покрытий при остывании от температур, соответствующих диапазону стеклования кварцевого стекла, до комнатной температуры в течение 10 секунд. Это происходит достаточно быстро, т.к. предприятия стараются увеличить скорость вытяжки для увеличения объема производства. Механизм формирования технологических остаточных напряжений

аналогичен заготовке силового стержня и описан в разделах 2.1 и 3.3.1. Фотография поперечного сечения оптического волокна типа Panda приведена на рисунке 2.1.

При решении задач необходимая степень дискретизации по времени подбиралась опытным путем со сгущением шага по времени в диапазоне температур стеклования материалов. Анализ полей температур, полученных при решении задачи нестационарной теплопроводности, позволил сделать вывод о незначительной неравномерности распределения температуры по радиусу (не более 3°C). При дальнейших исследованиях была принята гипотеза о равномерном изменении температуры по сечению волокна.

Четвертинка дискретной модели приведена на рисунке 4.3а, использовалась регулярная конечно-элементная сетка, со сгущением в зоне светопроводящей жилы. Все геометрические размеры были параметризированы. При решении задачи термомеханики была исследована сходимость численной процедуры по значению напряжения σ_x в центре светопроводящей жилы (рисунок 4.3б), т.к. оптические характеристики волокна по формулам (2.25)-(2.27) связаны с напряжениями. Для моделирования, принята конечно-элементная сетка с 12414 узловыми неизвестными, расхождение со следующим решением не превышает 0,13% (рисунок 4.4). Ввиду необходимости моделирования несовершенств геометрии НДС было получено на полном сечении волокна без учета симметрии. Рассматривался случай обобщенной плоской деформации.

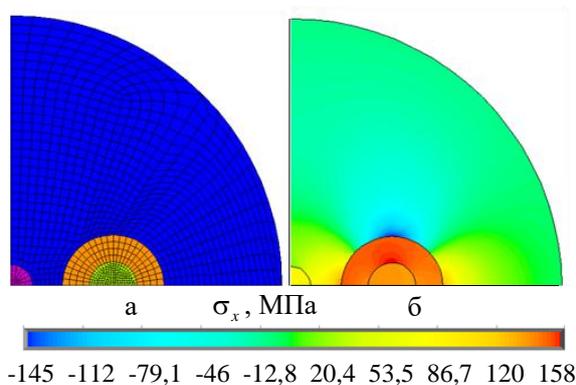


Рисунок 4.3 – Модель: а – дискретный аналог, б – характерное поле напряжений

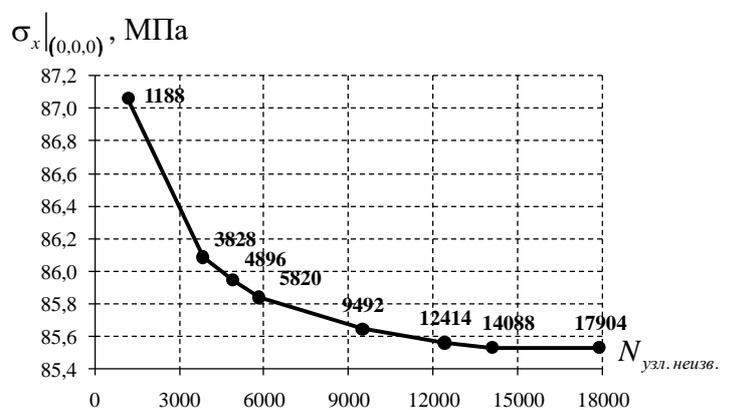


Рисунок 4.4 – Сходимость численной модели при увеличении числа узловых неизвестных

В результате математического моделирования были получены поля технологических остаточных напряжений (рисунок 4.5). На рисунке 4.6 приведены эпюры компонент тензора остаточных напряжений вдоль центрального сечения волокна после вытяжки. Самый высокий уровень напряжений реализуется в силовых стержнях.

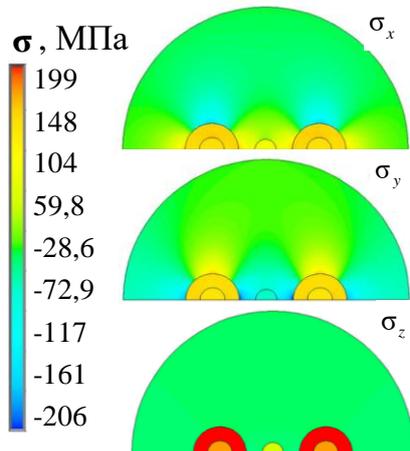


Рисунок 4.5 – Поля распределения остаточных напряжений в волокне после вытяжки

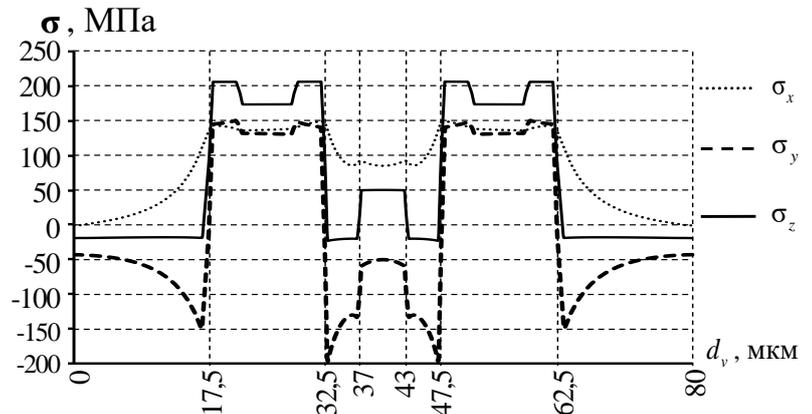


Рисунок 4.6 – Эпюры распределения компонент тензора остаточных напряжений вдоль центрального сечения волокна после вытяжки

Согласно данным исследования A.D. Yablon [133] уровень остаточных упругих напряжений в волокне после вытяжки может достигать 150 МПа. В рамках реализованной модели максимальный уровень остаточных напряжений достигает: $|\max \sigma_x| = 148,5$ МПа; $|\max \sigma_y| = 181,5$ МПа; $|\max \sigma_z| = 205,5$ МПа при заданной скорости охлаждения волокна. Данный факт отражает работоспособность построенных моделей и возможность их использования для широкого круга задач.

4.2 Численное исследование характера сопряжения защитно-упрочняющего покрытия и оптического волокна в модели технологической пробы

Для корректного учета условий контакта был выполнен анализ влияния характера сопряжения между волокном типа Panda (часть из кварцевого стекла) и слоями ЗУП. Для расчета использовалась трехмерная модель технологической пробы, представленная на рисунке 2.4, со стандартным соотношением слоев

защитных покрытий, радиус катушки принимался равным $R_{kat} = 5$ мм. На рисунке 4.7 приведена расчетная схема, где S_{K_1} – зона контакта между катушкой и внешним слоем ЗУП, S_{K_2} – зона контакта между внешним и внутренним ЗУП, S_{K_3} – зона контакта между внутренним ЗУП и кварцевой частью волокна. В таблице 4.1 приведены принятые к расчету параметры оптического волокна типа Panda. Расчетная схема включает 7 материалов, упругие свойства и КТР которых приведены в таблице 4.2.

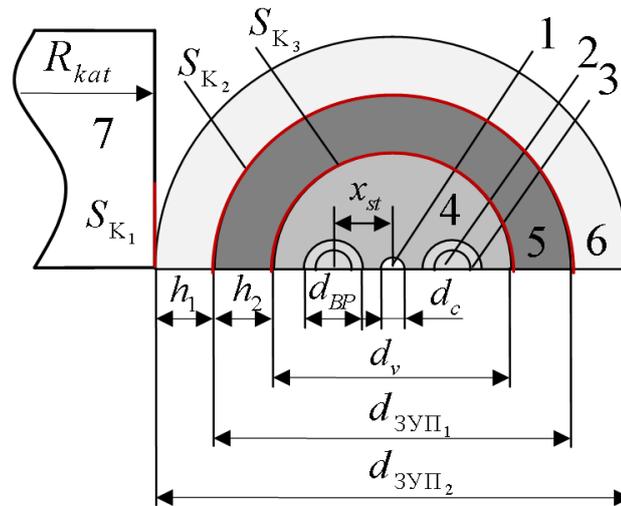


Рисунок 4.7 – Расчетная схема для моделирования:
1-7 – номера материалов; S_{K_1} , S_{K_2} , S_{K_3} – зоны контакта

Таблица 4.1 – Принятые к расчету параметры оптического волокна типа Panda

| Параметры исследуемого волокна | |
|--|---|
| $d_v = 80$ мкм – диаметр волокна (для передачи сигнала с $\lambda=1,55$ мкм); | $d_{BP} = 15$ мкм – диаметр внешнего слоя силового стержня, легированного 28% оксида бора B_2O_3 и 4% фосфорного ангидрида P_2O_5 ; |
| $d_c = 6$ мкм – диаметр с светопроводящей жилы, легированной 5% оксидом германия GeO_2 ; | $d_B = 7$ мкм – диаметр внутреннего слоя силового стержня, легированного 28% оксида бора B_2O_3 ; |
| $d_{ЗУП_1} = 130$ мкм – диаметр внутреннего ЗУП ₁ ; | $x_{st} = 15$ мкм – расстояние между центрами волокна и силового стержня |
| $d_{ЗУП_2} = 167$ мкм – диаметр внешнего ЗУП ₂ ; | $F = 0,2$ Н – сила натяжения волокна. |
| $h_1 = 25$ мкм – толщина внутреннего ЗУП; | |
| $h_2 = 18,5$ мкм – толщина внешнего ЗУП; | |

Таблица 4.2 – Свойства материалов

| Параметр | Материал | | | | | | |
|-----------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| E , МПа | 67939 | 49107 | 65370 | 72000 | 1837 | 7786 | 68600 |
| ν | 0,168 | 0,203 | 0,181 | 0,170 | 0,498 | 0,350 | 0,340 |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$, K^{-1} | 1,055 | 2,675 | 2,886 | 0,500 | 200 | 50 | 23 |

Математическое моделирование технологической пробы включает несколько шагов. Постановка задачи приведена в разделе 2.3. На первом шаге к построенной модели волокна из кварцевого стекла добавляются слои защитных покрытий и катушка, проводится дискретизация системы (с сохранением конечно-элементной сетки, оставшейся от расчета остаточных напряжений) со сгущением сетки в зоне контакта внешнего ЗУП с алюминиевой катушкой, задаются модели материалов ЗУП (2.24). Из построенного поперечного сечения технологической пробы путем поворота по радиусу катушки на $0,5^\circ$ создается трехмерная модель сектора одного витка волокна намотанного на катушку. Численная реализация была выполнена методом конечных элементов в среде ANSYS Mechanical APDL в трехмерной постановке. Модель строилась сразу в изогнутом состоянии, а изгиб моделировался созданием начального напряженно-деформированного состояния. Использовались четырехугольные восьмиузловые конечные элементы SOLID185 с лагранжевой аппроксимацией. Сопряжение объемов моделировалось при помощи контактной пары элементов CONTA173 и TARGE170. Для моделирования разного характера сопряжения использовались настройки контактной пары. Для описания определяющих соотношений материалов ЗУП (2.24) в ANSYS использовалась модель Prony [123]. Конечно-элементная модель строилась с учетом геометрии сечения оптического волокна. Выполнено уменьшение размера конечных элементов в светопроводящей жиле и вблизи зоны контакта. Максимальный объем конечного элемента волокна – 506 мкм^3 . Минимальный объем конечного элемента в светопроводящей жиле $3,5 \text{ мкм}^3$, вблизи области контакта 57 мкм^3 . Степень дискретизации модели – 57 тыс. узловых неизвестных (53 тыс. в объеме оптического волокна с учетом ЗУП).

В трехмерной модели по алгоритму, описанному в разделе 3.3.2, с использованием функции INISTATE задается поле начальных деформаций. В кварцевой части волокна начальное поле складывается из технологических остаточных деформаций (найденных в разделе 4.1), деформаций от изгиба и натяжения волокна, а в полимерных покрытиях – из деформаций от изгиба и натяжения, рассчитанных по формулам (2.19). Такая процедура значительно

сокращает время на расчет и экономит вычислительные ресурсы по сравнению с нахождением остаточных технологических напряжений в изначально трехмерной модели. А также позволяет моделировать изгиб и натяг без явного воздействия усилий на волокно.

На следующем шаге в модели меняются граничные условия, задаются условия контакта, термоцикл. После решения задачи мы получаем зависимости деформационных и оптических характеристик, изменяющиеся в термоцикле (рисунок 2.5). Такой алгоритм используется во всех последующих исследованиях при изменении параметров в технологической пробе.

Сходимость численной процедуры подтверждается исследованиями для дискретизации волокна в задаче технологических остаточных напряжений, т.к. в трехмерной модели используется выбранное конечно-элементное разбиение, а исследование сходимости для трехмерной модели требует больших временных и вычислительных затрат.

Для анализа влияния характера сопряжения по контактными поверхностям S_{K_2} , S_{K_3} были рассмотрены три модели, граничные условия по контактной поверхности S_{K_1} принимались по формуле (2.22) и были одинаковыми во всех моделях:

1. Модель №1 – идеальный контакт по S_{K_2} и S_{K_3} (полное сопряжение материалов, реализованное путем создания конечно-элементной сетки узел в узел, т.е. создание одинакового поля перемещений и напряжений на границе сред);
2. Модель №2 – полная адгезия по S_{K_2} и S_{K_3} (моделирование условий полного прилипания поверхностей контакта при любом характере воздействия на систему, т.е. создание только поля одинаковых перемещений на границе сред);
3. Модель №3 – фрикционный контакт по S_{K_2} и S_{K_3} (моделирование контакта с учетом трения и всеми типами контактных состояний (прилипание, проскальзывание, отлипание) с заранее неизвестным характером распределения площадей сопряжения с разным контактным статусом).

Сопряжения моделировались при помощи контактных пар элементов CONTA173 (контактный элемент типа «поверхность – поверхность») и TARGE170 (целевой элемент, описывающий границу тела сопряжения). В моделях № 2 и № 3 элементы CONTA173 наносились на мягкий внутренний ЗУП. В модели № 3 для внутреннего ЗУП задается коэффициент трения. Фрикционные свойства материалов защитных покрытий мало изучены. В справочной литературе [134] коэффициенты трения для полимеров разных наименований при разных условиях могут быть, как менее 0,01, так и более 1. Диапазон изменения коэффициентов трения рассматриваемых пар материалов может быть достаточно широким, при этом адгезия материалов полимерных покрытий может быть достаточно высокой для обеспечения сопряжения с оптическим волокном, поэтому в качестве первого приближения выбран постоянный коэффициент трения 0,6. Для полноценного моделирования фрикционного контакта требуется исследование изменения коэффициентов трения контактных пар материалов (катушка – ЗУП₂, ЗУП₁-ЗУП₂, ЗУП₁-волокно) в широком диапазоне температур и нагрузок, которые не были запланированы в рамках данного исследования.

Влияние характера сопряжения оценивалось по контактным параметрам на поверхности S_{K_1} и модовому двулучепреломлению, вычисленному по формуле (2.27). На рисунке 4.8а приведено изменение контактного давления на поверхности S_{K_1} . Характер изменения в моделях № 2 и № 3 совпадает. Отличие поведения модели № 1 наблюдается на первом шаге нагружения и исчезает после нагрева до +60°C. В моделях № 2 и № 3 контактное давление на поверхности S_{K_3} изменяется на уровне погрешности и колеблется в районе 0, а контактное давление на поверхности S_{K_2} изменяется в пределах 20 Па, что на три порядка меньше по сравнению с контактным давлением на поверхности S_{K_1} . Расхождения поверхностей контакта в модели № 3 не наблюдается.

На рисунке 4.8б приведено изменение двулучепреломления во время термоцикла. Характер изменения в моделях № 2 и № 3 совпадает. Отличие поведения модели № 1 наблюдается в зонах выдержки при постоянных

температурах. Была сделана оценка расхождения численного решения для модели № 1 и № 2 по формуле:

$$\Delta \tilde{B} = \frac{|B_{\text{mod1}} - B_{\text{mod2}}|}{B_{\text{mod1}}} \cdot 100, \% \quad (4.1)$$

где B_{mod1} и B_{mod2} – двулучепреломление, найденное при расчете по модели № 1 и № 2 соответственно. Расхождение между моделями не превышает 0,18%.

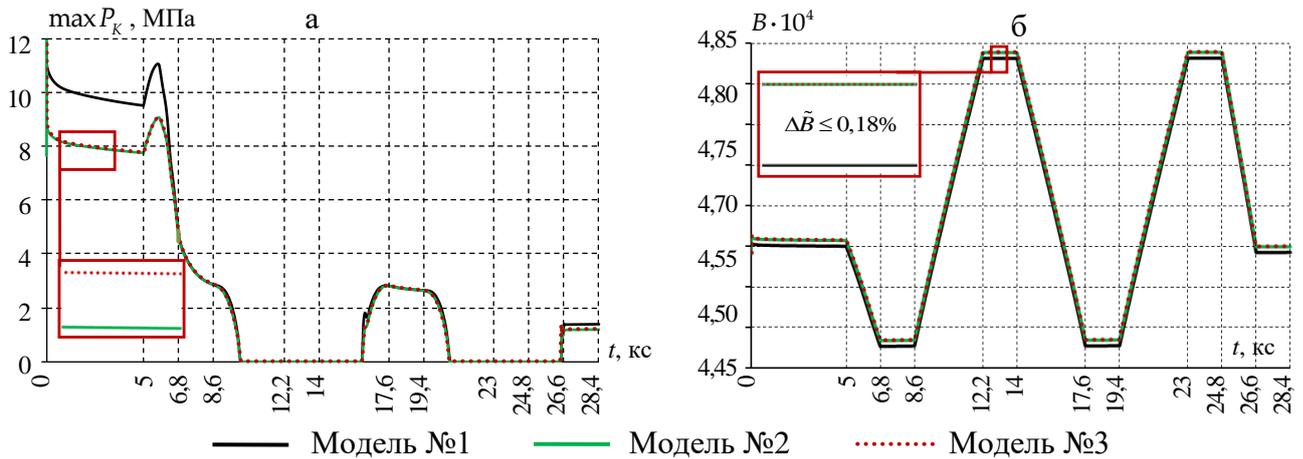


Рисунок 4.8 – Влияние характера сопряжения на параметры волокна:
 а – максимальное контактное давление на S_{K_1} во время термоцикла;
 б – изменение двулучепреломления во время термоцикла

В результате анализа поведения волокна в условиях технологической пробы с разными вариантами сопряжения контактных поверхностей для дальнейшего моделирования была выбрана модель № 1, в которой реализуется идеальный контакт между волокном и полимерными покрытиями. В последующих исследованиях будет рассматриваться только одна контактная поверхность S_{K_1} .

4.3 Влияние радиуса намотки на эволюцию технологических напряжений и оптические характеристики волокна типа Panda

Стандартная процедура технологической пробы проводится на катушках радиусами 50 мм и 22 мм. На сегодняшний день ВОГ изготавливают с катушкой радиусом 50 мм. Но тенденции современного мира идут по пути миниатюризации измерительных приборов. Разработка микро/нано приборов с низкой стоимостью изготовления и энергопотребления, но высокой точностью, является одним из

приоритетных направлений [135]. Масса и габариты являются одними из важнейших показателей. Поэтому с точки зрения будущего уменьшения ВОГ, а также усиления эффекта изгиба и натяга в рассмотрение был включен радиус катушки 5 мм.

Исследования выполнены при стандартном соотношении толщин ЗУП. Параметры волокна описаны в таблице 4.1, свойства в таблице 4.2. Термоцикл приведен на рисунке 2.5. На основе построенной численной модели были получены поля распределения технологических напряжений в волокне в условиях технологической пробы при 23°C после термоцикла (рисунок 4.9).

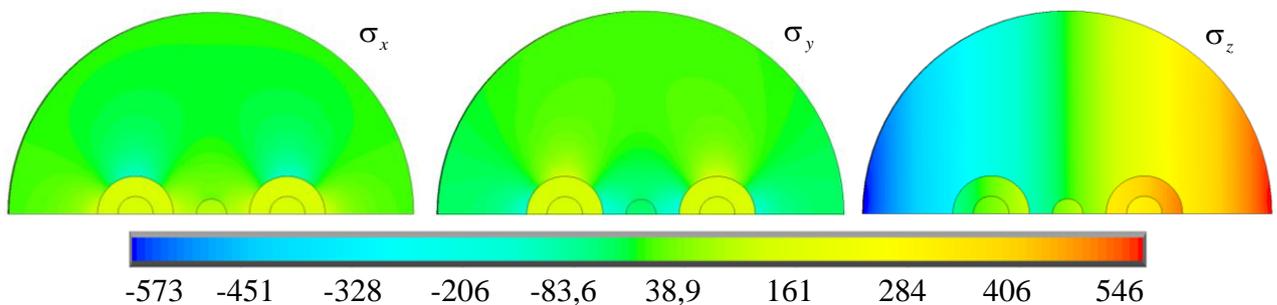


Рисунок 4.9 – Распределение технологических напряжений в волокне в условиях технологической пробы при 23°C после термоцикла

Радиус катушки и изгиб волокна оказывает наибольшее влияние на компоненту тензора напряжений σ_z и контактное давление (рисунок. 4.10). Уровень напряжений σ_x и σ_y при контакте и изгибе меняются незначительно (менее 1 %). Изгиб волокна оказывает существенное влияние на НДС системы при катушке радиусом 5 мм. Характер распределения напряжений по сечению волокна ассиметричный. Максимальный уровень напряжений по компоненте σ_z по сравнению с остаточными напряжениями вырос более чем в 2,5 раза с 205 до 527 МПа. При радиусах катушки 22 и 50 мм максимальный уровень σ_z по сравнению с остаточными напряжениями вырос на 48,6 и 33,1 % соответственно.

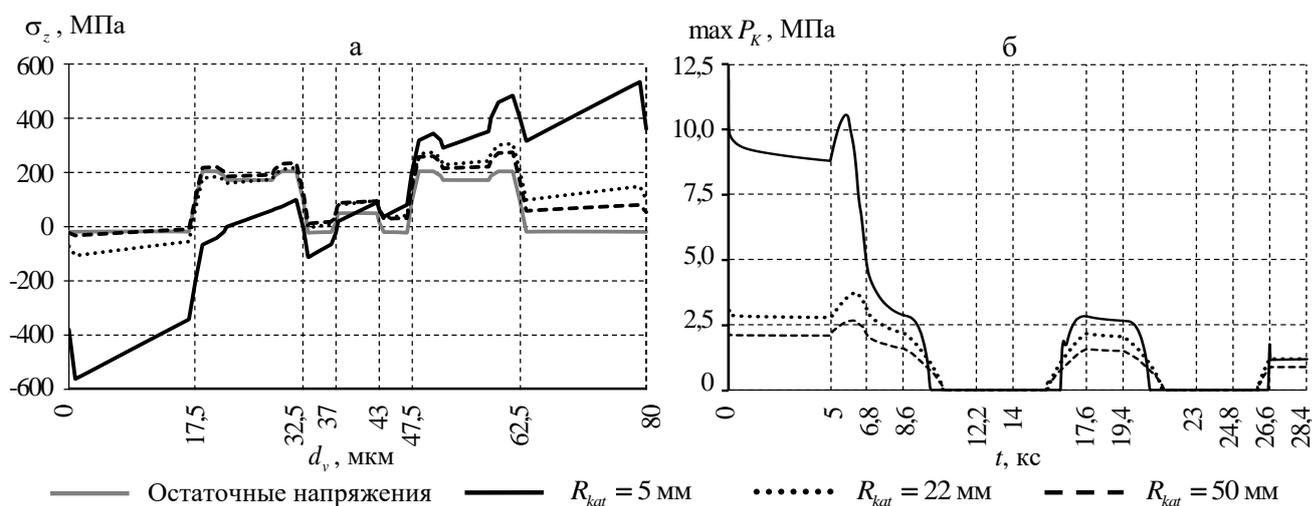


Рисунок 4.10 – Влияние изгиба на параметры деформирования волокна:
 а – σ_z вдоль центрального сечения волокна после термоцикла при 23 °С;
 б – максимальное контактное давление во время термоцикла

При уменьшении радиуса катушки с 50 до 5 и 22 мм наблюдается увеличение максимального уровня контактного давления в 4,44 и 1,39 раза соответственно. Максимальный уровень контактного давления наблюдается при первом нагреве до +60 °С. Радиус катушки влияет и на температуру, при которой происходит полное отлипание поверхностей контакта из-за термической усадки материалов сборки. При радиусе катушки 5 мм раскрытие контакта происходит при температуре приблизительно 15 °С, при 22 и 50 мм при -3 °С.

На рисунке 4.11 показаны изменения показателей преломления в двух ортогональных осях распространения света в центре светопроводящей жилы и двулучепреломление. При катушке 5 мм наблюдаются нелинейности в изменениях показателей преломления, что связано с изгибом и релаксационными переходами в ЗУП. Данного эффекта не наблюдается при больших катушках. Характер изменения двулучепреломление в рамках термоцикла не зависит от радиуса катушки. При этом количественные значения B при катушке 5 мм меньше не более чем на 2.2 %, чем при больших катушках, т.е. при уменьшении радиуса катушки уменьшается и двулучепреломление.

Оптические параметры при катушках 22 и 50 мм имеют малые отличия. Основные отличия наблюдаются в зонах выдержки при максимальной

положительной температуре 60 °С (не более 2,5 %) и в конце термоцикла в зоне выдержки при комнатной температуре (не более 6,74 %).

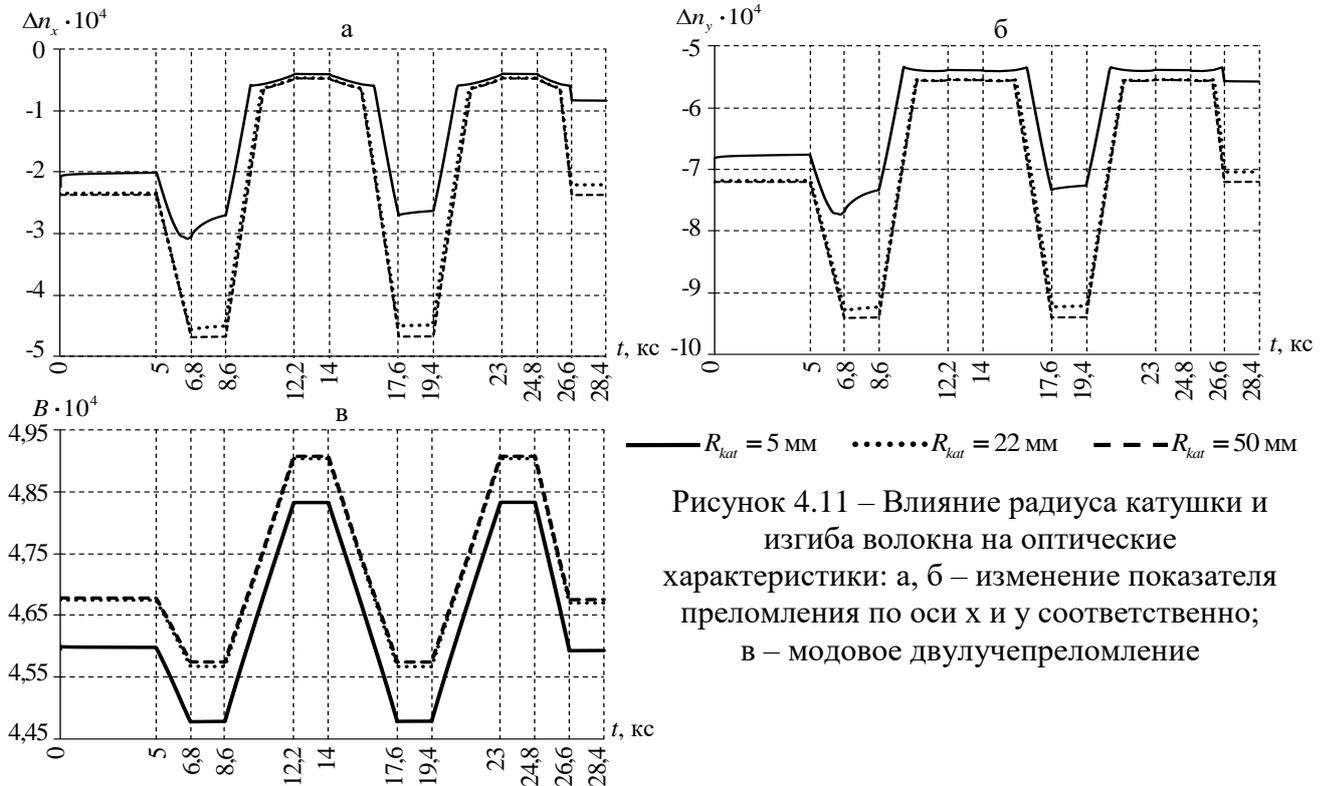


Рисунок 4.11 – Влияние радиуса катушки и изгиба волокна на оптические характеристики: а, б – изменение показателя преломления по оси х и у соответственно; в – модовое двулучепреломление

На рисунке 4.12 показаны изополя материального двулучепреломления, полученные по формуле (2.26) в светопроводящей жиле при контакте с разными катушками. Характер распределения материального двулучепреломления также мало зависит от радиуса катушки. Влияние радиуса катушки на минимальный и максимальный уровень параметра не превышает 2 %.

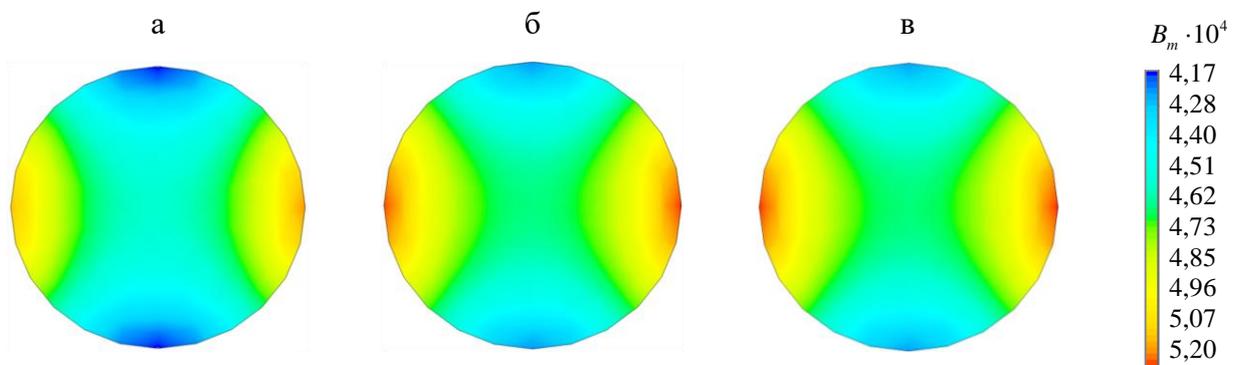


Рисунок 4.12 – Материальное двулучепреломление после термоцикла при 23 °С:

а – $R_{kat} = 5$ мм, б – $R_{kat} = 22$ мм, в – $R_{kat} = 50$ мм

Н. Wang с соавторами [101] рассмотрели отдельно влияние изгиба в диапазоне радиусов $2 \div 60$ мм и температуры в диапазоне $[-40^{\circ}\text{C}; +65^{\circ}\text{C}]$ со скоростью изменения температуры $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ на двулучепреломление волокна Panda. Был сделан вывод, что изгиб при радиусе более 10 мм практически не влияет на изменение двулучепреломления. Величина изменения двулучепреломления была посчитана по аналитической формуле, не учитывающей все условия работы волокна. С уменьшением радиуса изгиба двулучепреломление, наведенное только изгибом, увеличивалось. Отмечается уменьшение величины двулучепреломления с повышением температуры. Данный эффект прослеживается и в нашем исследовании на рисунке 4.11в в зонах выдержки II и IV при $+60^{\circ}\text{C}$.

4.4 Влияние несоосности оси светопроводящей жилы и центра волокна на эволюцию технологических напряжений и оптические характеристики волокна типа Panda

На практике оптическое волокно не всегда имеет проектную геометрию. Наблюдаются отклонения диаметров, эллиптичности, положения центров конструктивных элементов (светопроводящей жилы, силовых стержней). В работе [136] был проведен анализ несовершенств геометрии волокна типа Panda. Одним из параметров было отклонение от соосности светопроводящей жилы и центра волокна, поэтому в этом разделе проведена оценка его влияния на НДС и оптические характеристики.

Исследования выполнены при стандартном соотношении толщин ЗУП для радиусов катушек 50 и 10 мм. Параметры волокна описаны в таблице 4.1, свойства в таблице 4.2. Исследование проводилось на 1 витке цикла, приведенного на рисунке 2.5, в зонах выдержки I, II, III. Рассматривались отклонения светопроводящей жилы по оси x в пределах $\Delta h_x = \pm 4 \text{ мкм}$ и по оси y в пределах $\Delta h_y = \pm 4 \text{ мкм}$. Остальные параметры волокна не варьировались.

Следуя алгоритму решения на рисунке 4.1, сначала были определены технологические остаточные напряжения в волокнах с несовершенством геометрии. Характерные картины эпюр для пограничных вариантов смещения светопроводящей жилы приведены на рисунке 4.13. Смещение по оси x приводит к росту уровня напряжений в светопроводящей жиле (она становится ближе к одному из силовых стержней, поэтому влияние этого силового стержня на НДС растет и приводит к асимметрии распределения напряжений по сечению), а по оси y , наоборот, к снижению, т.к. жила удаляется от силовых стержней.

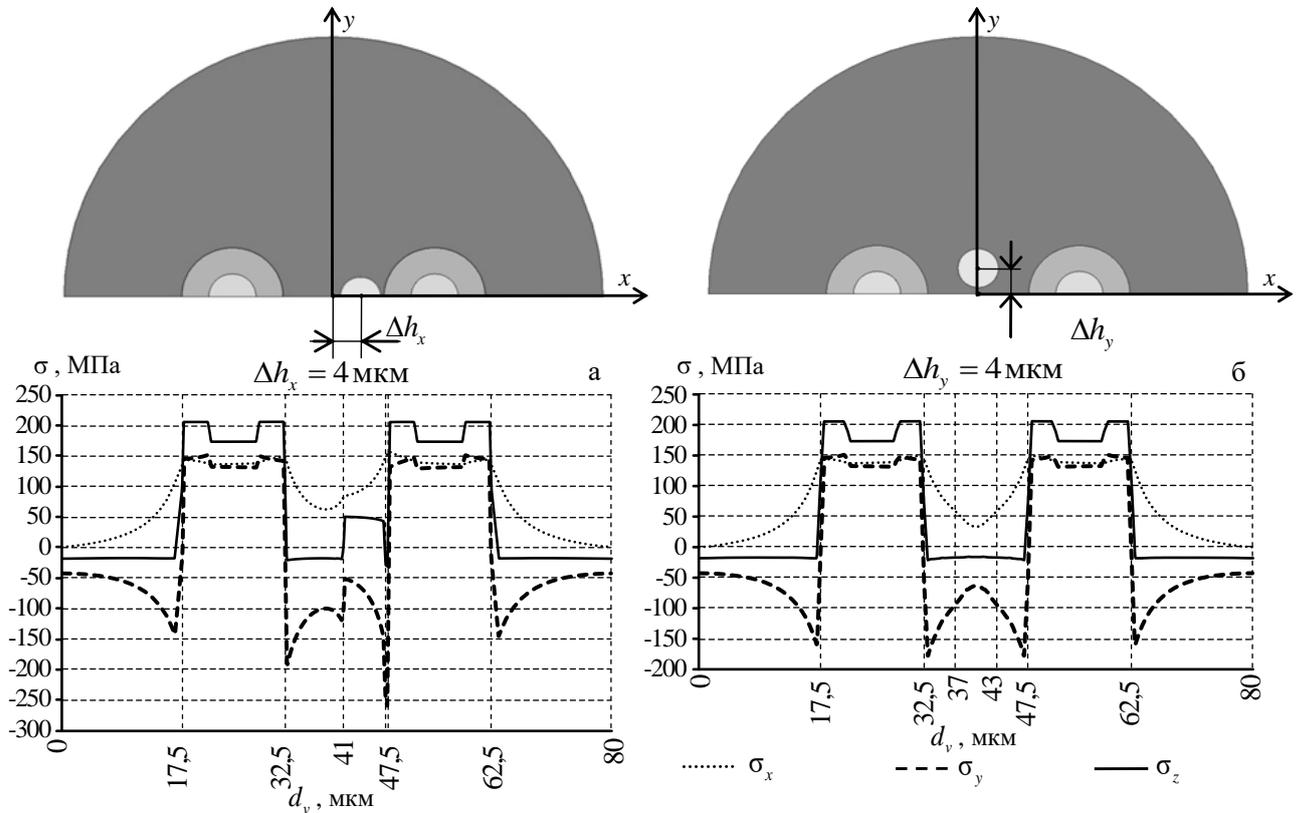


Рисунок 4.13 – Эпюры остаточных напряжений после вытяжки, вдоль поперечного сечения:
а – $\Delta h_x = 4$ мкм, б – $\Delta h_y = 4$ мкм

На следующем шаге были получены зависимости напряженно-деформированного состояния в условиях технологической пробы (расчетная схема приведена на рисунке 2.4). Т.к. нас интересует влияние несовершенств геометрии на оптические характеристики волокна, исследовалась эволюция напряжений в центре светопроводящей жилы. На рисунке 4.14 приведена эволюция напряжений для смещений $\Delta h_x = 4$ мкм и $\Delta h_y = 4$ мкм.

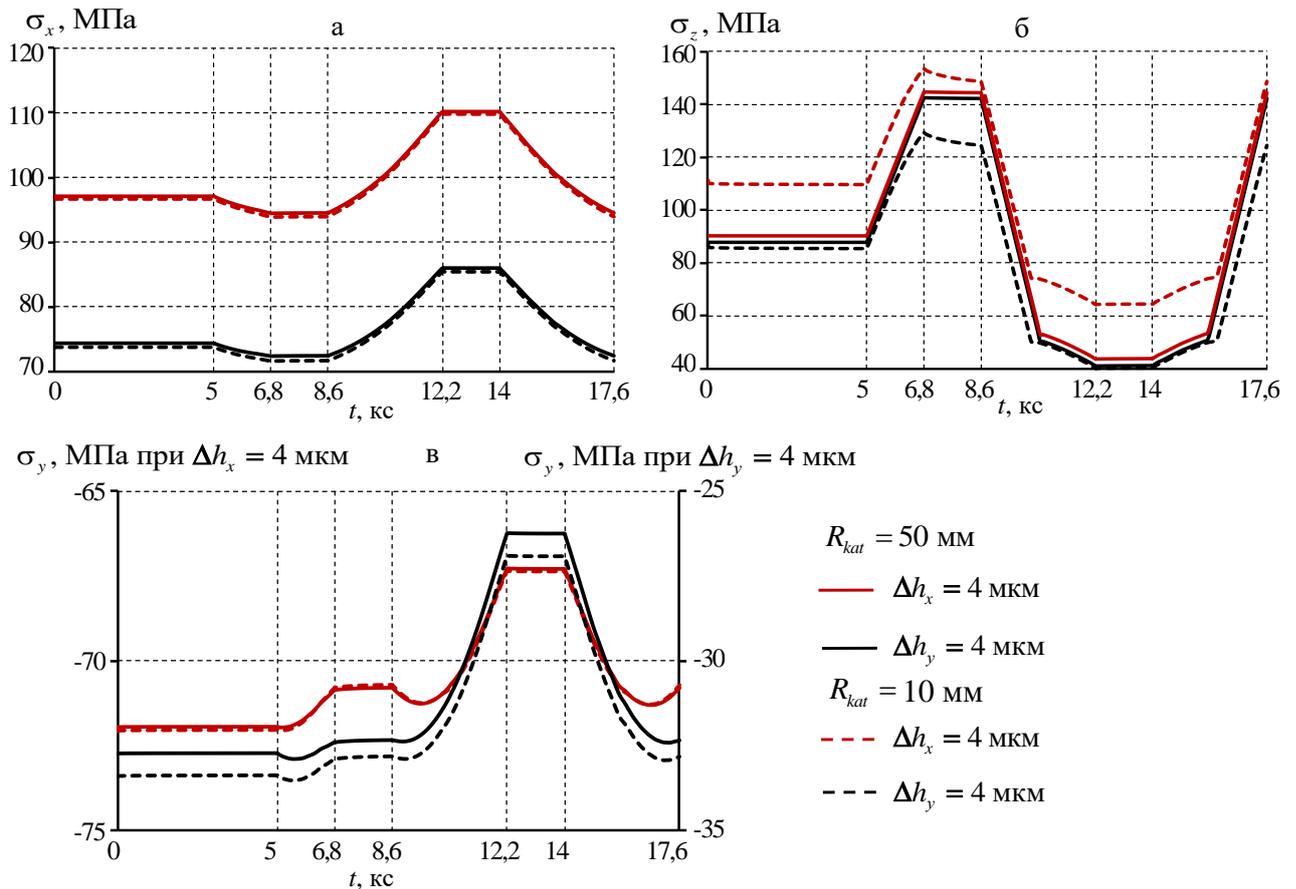


Рисунок 4.14 –Эволюция напряжений в центре светопроводящей жилы: а – σ_x б – σ_z , в – σ_y

Как и следовало ожидать, уровень напряжений σ_x и σ_y при смещении светопроводящей жилы по оси y снизился по сравнению с идеальной геометрией на 13,7% и 33,1% соответственно, а по оси x повысился на 12% и 30,7 % соответственно (рисунки 4.14а и 4.14в). Радиус катушки практически не оказывает влияние на эти компоненты, а изменение от температуры происходит в диапазоне 25%. Но на поведении компоненты σ_z в термоцикле влияют как радиус, так и температура. Влияние радиуса прослеживается в зоне выдержки при +60°C (рисунок 4.14б). На радиусе 10 мм появились нелинейные участки, связанные с релаксационным переходом в размягченное состояние внешнего ЗУП и соответствующего ему снижения жесткости. А изменения величины σ_z в термоцикле может достигать 2,3 раза. Изменение температуры оказывает более существенное влияние на параметры системы при сдвиге светопроводящей жилы по оси y .

Было исследовано изменение модового двулучепреломления при радиусе катушки 50 мм от величины смещения светопроводящей жилы по формуле $\Delta B = B' - B_0$, где B' – двулучепреломление волокна со смещением жилы; B_0 – двулучепреломление волокна с проектной геометрией. Изменение параметра показано на примере трех зон выдержки при постоянной температуре в термоцикле (рисунок 4.15).

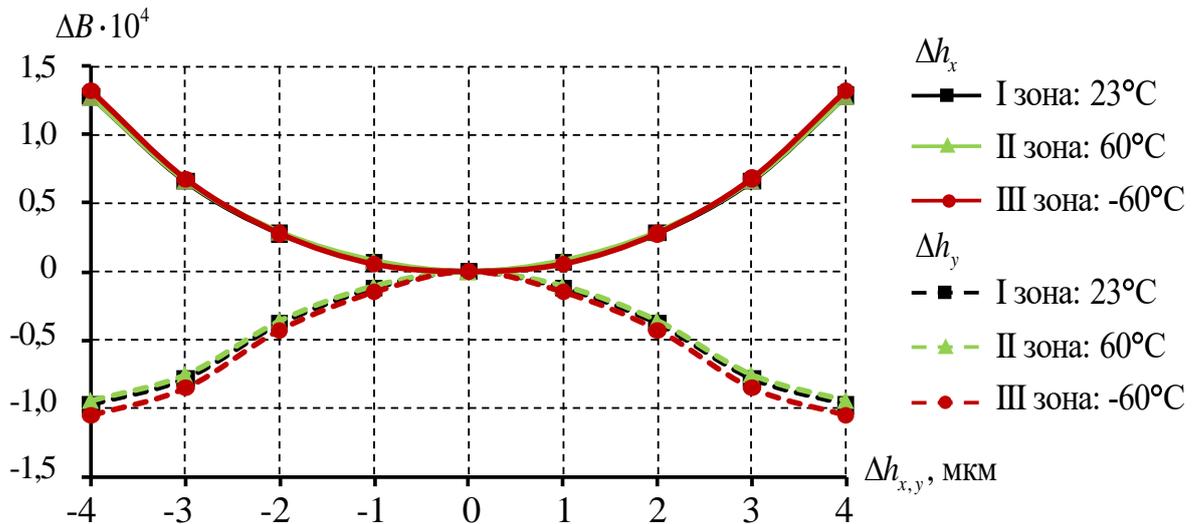


Рисунок 4.15 – Изменение модового двулучепреломления волокна при несоосности светопроводящей жилы

Для приведенной ориентации силовых стержней отклонение жилы по оси x приводит к увеличению двулучепреломления, а по оси y наоборот к его уменьшению. Отклонение по оси x не зависит от температуры, а по оси y наблюдается закономерность: чем больше отклонение светопроводящей жилы, тем больше разница между ΔB при разных температурах.

Был произведен анализ изменения показателей преломления по зонам выдержки в центре светопроводящей жилы. Эволюция контактного давления оказывает влияние на изменение показателя преломления на участках выдержки после нагрева. Показатели преломления изменяются нелинейно, влияние контакта более выражено при уменьшении радиуса катушки. В таблице 4.3 приведены значения для пограничных случаев. Чем больше разница между показателями преломления по осям x и y в светопроводящей жиле, тем лучше сохраняется состояние поляризации проходящего по ней света.

Таблица 4.3 – Величины изменения показателей преломления по зонам выдержки

| Параметр | $\Delta n_x \cdot 10^4$ | | | $\Delta n_y \cdot 10^4$ | | | R_{kat} , мм |
|----------------------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------------------|
| | 23°C | 60°C | -60°C | 23°C | 60°C | -60°C | |
| $\Delta h_x = 4$ мкм | -1,40 | -3,73 | 0,28 | -7,44 | -9,63 | -6,05 | 50 |
| | -2,22 | -3,98 | -0,78 | -8,24 | -9,86 | -6,92 | 10 |
| $\Delta h_y = 4$ мкм | -2,81 | -5,11 | -1,12 | -6,63 | -8,85 | -5,13 | 50 |
| | -2,69 | -4,43 | -1,12 | -6,51 | -8,15 | -5,13 | 10 |

Наибольшая разница в показателях преломления по осям x и y в центре светопроводящей жилы реализуется при $\Delta h_x = 4$ мкм не зависимо от радиуса катушки. Эта разница меняется в термоцикле в пределах 6%. Но близость силового стержня вносит асимметрию в поле напряжений, что в свою очередь отрицательно влияет на прохождение света.

4.5 Влияние геометрической конфигурации защитно-упрочняющего покрытия

Влияние изгиба, натяга, контакта и вязкоупругих свойств ЗУП на параметры напряженно-деформированного состояния и оптические характеристики волокна лучше прослеживается на катушке радиусом 5 мм. Было принято решение исследования соотношения толщин ЗУП проводить при $R_{kat} = 5$ мм. Уменьшение катушки не искажает оптический сигнал. При этом позволяет выявить эффекты влияния свойств материалов и параметров системы на ее работоспособность.

Расчетная схема приведена на рисунке 4.7. Подробное описание свойств материалов ЗУП было приведено в разделе 2.3. С целью анализа влияния соотношения толщин слоев ЗУП на деформационные и оптические характеристики волокна, было рассмотрено 7 соотношений толщин внутреннего и внешнего слоев при сохранении внешнего диаметра волокна 167 мкм (таблица 4.4). На рисунке 4.16 приведены модели волокна со стандартными и пограничными соотношениями толщин ЗУП.

Таблица 4.4 Варианты соотношения внутреннего и внешнего ЗУП

| Параметр | Обозначения соотношения толщин ЗУП | | | | | | |
|------------------|------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | h_{10_90} | h_{20_80} | h_{30_70} | h_{standart} | h_{70_30} | h_{80_20} | h_{90_10} |
| h_1 , МКМ | 4,35 | 8,7 | 13,05 | 25 | 30,45 | 34,8 | 39,15 |
| h_2 , МКМ | 39,15 | 34,8 | 30,45 | 18,5 | 13,05 | 8,7 | 4,35 |
| h_1 , % of h | 10 | 20 | 30 | 57,5 | 70 | 80 | 90 |
| h_2 , % of h | 90 | 80 | 70 | 42,5 | 30 | 20 | 10 |

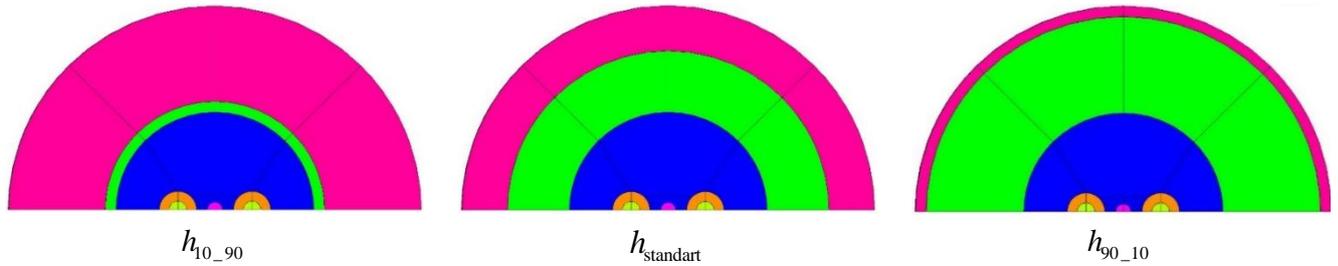


Рисунок 4.16 – Модели волокна с разными соотношениями толщин ЗУП

Распределение технологических остаточных напряжений было определено в разделе 4.3. Для анализа результатов исследования в рамках термоцикла выделено 6 зон выдержки при постоянной температуре: *I* – 23 °С; *II* – 60 °С; *III* – -60 °С; *IV* – 60 °С; *V* – -60 °С; *VI* – 23 °С (рисунок 2.5). Деформационные и оптические параметры рассматриваются в середине временного интервала выдержки.

4.5.1 Влияние на напряженно-деформированное состояние

Характерная картина изменения компонент тензора напряжений во время термоцикла при стандартном соотношении ЗУП приведена на рисунке 4.17а. На рисунках 4.17б – 4.17г приведена зависимость компонент тензора напряжений от толщины внутреннего слоя полимерного покрытия.

Наибольшее влияние на характер изменения компонент σ_x и σ_y оказывает отрицательная температура. Данный эффект связан с релаксационными переходами в низкомодульной буферной прослойке. При -60°С внутренний слой защитного покрытия находится в застеклованном состоянии. Разброс значений σ_x , σ_y при -60°С не превышает 10-20 МПа. Максимальные значения наблюдаются при стандартном соотношении ЗУП (рисунки 4.17б и 4.17в). При

положительных температурах зависимость от соотношения толщин ЗУП σ_x , σ_y линейная.

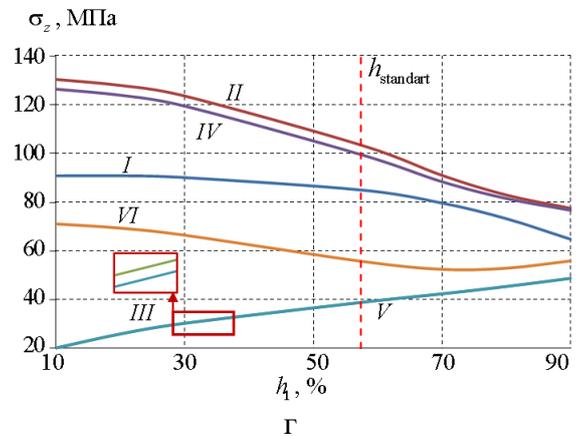
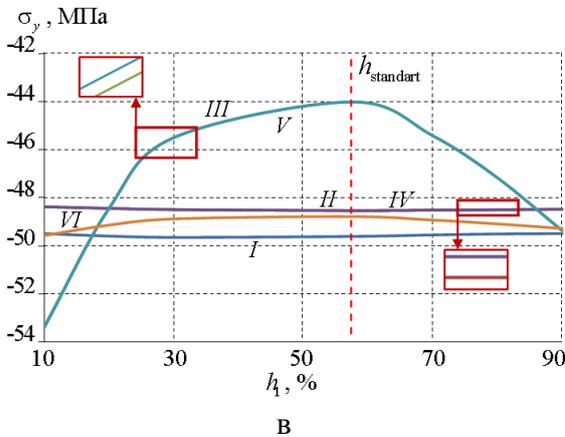
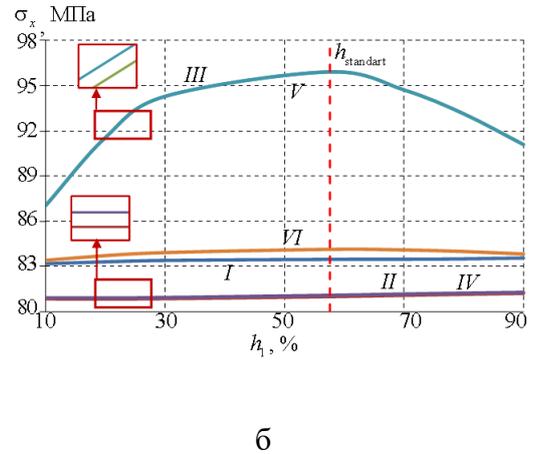
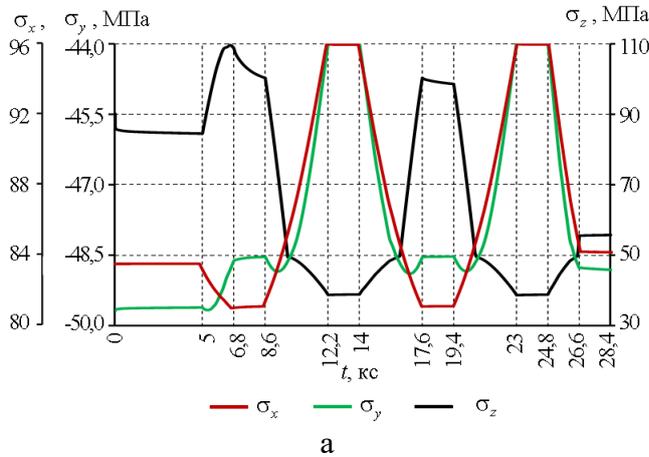


Рисунок 4.17 – Эволюция компонент тензора напряжений в центре светопроводящей жилы волокна в термоцикле при h_{stand} (а); б, в и г – зависимость компонент σ_x , σ_y и σ_z соответственно от толщины внутреннего покрытия по зонам выдержки

Максимальный вклад в тензор напряжений оказывает σ_z . На σ_z оказывают значительное влияние изгиб, натяг волокна и релаксационные переходы внешнего ЗУП. На участках выдержки при 60°C можно отметить нелинейность изменения параметра (рисунок 4.17г). Наибольшие отклонения параметров происходят на первом участке нагрева до 60°C . Разброс значений составляет $78 \div 135$ МПа. На участках выдержки при -60°C наблюдается увеличение σ_z при увеличении толщины внутреннего ЗУП. Характер изменения линейный. Снижение σ_z при увеличении толщины внутреннего покрытия наблюдается на участках выдержки при положительных температурах. Зависимости нелинейные. Два цикла

нагрузки приводят к снижению σ_z при комнатной температуре в среднем на 25 %.

Особый интерес представляет анализ влияния термосилового нагружения и геометрической конфигурации ЗУП на параметры области контакта. Основной характеристикой зоны сопряжения при контакте без учета трения является контактное давление. На рисунке 4.18 показано распределение зависимости максимального контактного давления, которое наблюдается в точке первоначального сопряжения волокно-катушка.

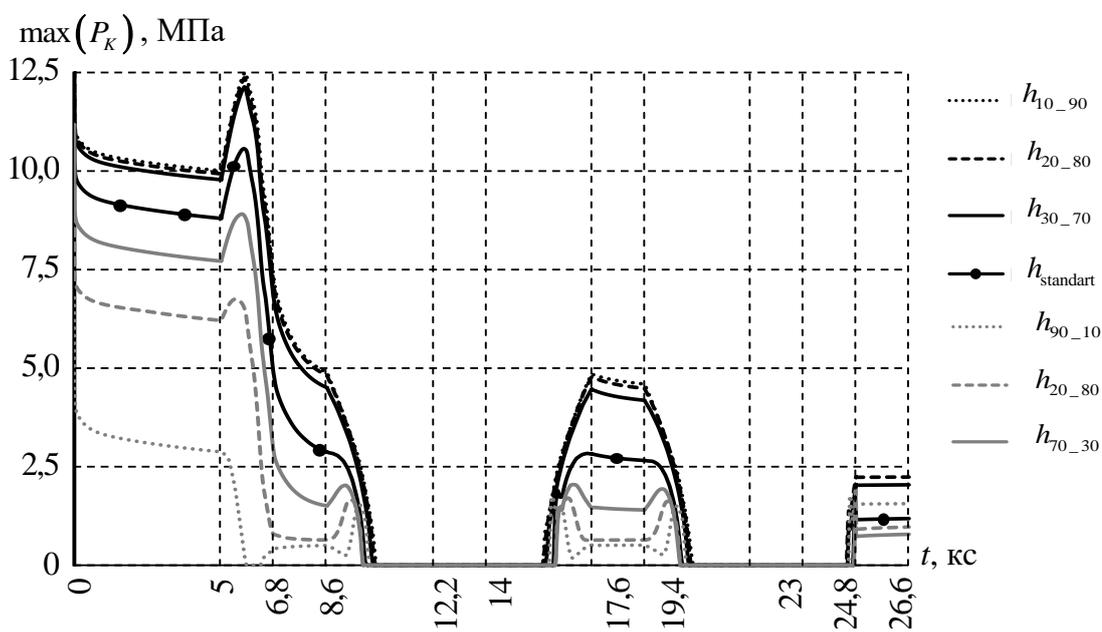


Рисунок 4.18 – Эволюция контактного давления в условиях термоцикла

Релаксационные переходы в материалах оказывают влияние не только на НДС системы, но и на контактное давление, что связано с непрерывным изменением площади контактного взаимодействия под воздействием температуры. При толщине внешнего ЗУП более 50% от h наблюдается незначительное влияние h_2 на качественные и количественные закономерности изменения параметров зоны контакта. Материал внешнего ЗУП в меньшей степени воспринимает силовое нагружение, контактное давление распределяется по меньшей площади, чем при стандартном распределении толщин ЗУП.

При толщине внутреннего ЗУП более 50 % от h наблюдается значительное влияние, как температуры, так и величины h_2 на деформирование многослойного

покрытия, что приводит к более неравномерному изменению $\max P_K$: появляются зоны значительного снижения параметра, в неблагоприятном случае контактное давление стремится к 0. Данный эффект связан со значительным деформированием внутреннего ЗУП и площади контактного взаимодействия при незначительном изменении силового нагружения.

Расхождение контактных поверхностей для разных соотношений толщин ЗУП происходит при разных температурах. В диапазоне температур $4 \div 19$ °С наблюдается полное раскрытие контактного сопряжения во всех вариантах соотношений толщин ЗУП, что объясняется усадкой алюминиевой катушки (таблица 4.5). При -60 °С наблюдается максимальное расхождение поверхностей сопряжения, например, для стандартного соотношения толщин ЗУП на 8,3 мкм.

Таблица 4.5 – Параметры контактного взаимодействия

| Параметр | Обозначения соотношения толщин ЗУП | | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | h_{10_90} | h_{20_80} | h_{30_70} | h_{standart} | h_{70_30} | h_{80_20} | h_{90_10} |
| $\max P_K$, МПа | 12,59 | 12,56 | 12,50 | 11,90 | 11,17 | 10,03 | 6,95 |
| T °С расхождения поверхностей | 4 | 5 | 7 | 15 | 19 | 17 | 11 |

4.5.2 Влияние на оптические характеристики

Оценка влияния геометрии системы на условия прохождения сигнала по светопроводящей жиле может быть сделана по изменению показателей преломления в двух ортогональных осях распространения света, которые возникают вследствие воздействия асимметричных остаточных напряжений вокруг светопроводящей жилы, инициируемые силовыми стержнями. На рисунке 4.19 приведена характерная картина изменения показателей преломления в термоцикле для стандартного и пограничных случаев. Термоциклирование приводит к снижению показателей преломления сердцевины относительно волокна в спокойном состоянии. Показатель по оси y снижается больше, чем по оси x . Из-за разного соотношения толщин ЗУП эти величины отличаются уже при комнатной температуре. Релаксационные переходы полимерных материалов

оказывают максимальное влияние на систему на первом цикле нагружения. На участках выдержки волокна при -60°C наблюдается значительное влияние соотношения толщин ЗУП на Δn_x , которое при h_{10_90} и h_{90_10} отличается от h_{standart} в 3 и 0,4 раза соответственно.

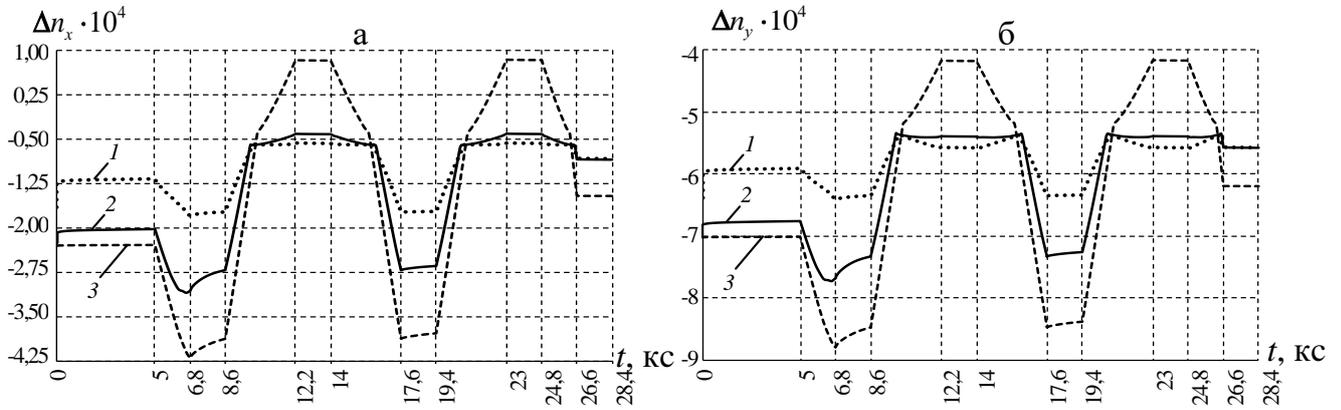


Рисунок 4.19 – Эволюция отклонения показателя преломления в центре светопроводящей жилы в условиях термоцикла: а – по оси x , б – по оси y : 1 – h_{90_10} , 2 – h_{stand} , 3 – h_{10_90}

Был сделан анализ зависимости параметров Δn_x и Δn_y от толщины внутреннего покрытия (рисунок 4.20), который иллюстрирует стабильность изменения показателей преломления под воздействием температуры.

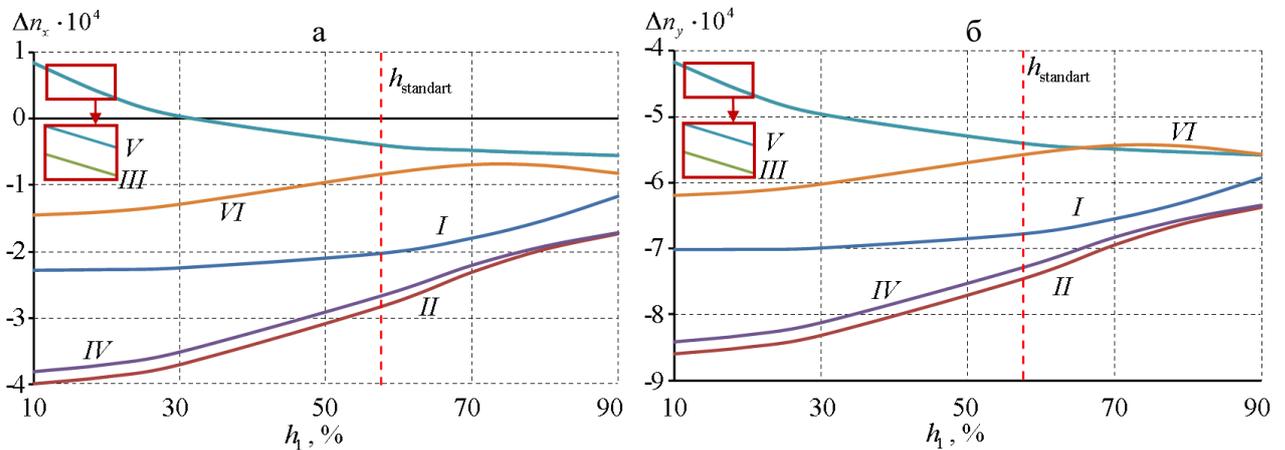


Рисунок 4.20 – Отклонения показателя преломления в центре светопроводящей жилы в условиях термоцикла а) по оси x , б) по оси y

При увеличении толщины внешнего ЗУП при температуре ниже -24°C происходит смена знака Δn_x . Это связано с потерей контакта с катушкой, большим влиянием изгиба и температурной деформации, а также фазовым переходом в материале внутреннего ЗУП. При увеличении толщины внешнего

слоя тонкая внутренняя буферная прослойка перестает выполнять свои защитные функции. На изменение Δn_y соотношение толщин ЗУП влияет не значительно, при h_{10_90} и h_{90_10} отличается от h_{standart} на 22% и 3% соответственно. Наибольшее влияние на параметры оказывает напряжение σ_z . При увеличении толщины внутреннего покрытия при всех вариантах температуры разница показателей преломления стремится к минимуму. Меньше всего разброс значений наблюдается при толщине внутреннего ЗУП более 70%. Изменение показателя преломления происходит в пределах $2 \cdot 10^{-4}$. При увеличении толщины внутренней оболочки сглаживается воздействие температуры на изменение показателей преломления в светопроводящей жиле.

Были построены профили изменения показателей преломления по оси x , соединяющей силовые стержни (медленная ось), и перпендикулярной ей оси y (быстрая ось) по сравнению со значением в центре светопроводящей жилы, вычисленные по формулам:

$$\Delta \tilde{n}_x = \Delta n_x - \Delta n_x|_{\tilde{x}=(0;0;0)}, \quad \Delta \tilde{n}_y = \Delta n_y - \Delta n_y|_{\tilde{x}=(0;0;0)}$$

где $\Delta n_x|_{\tilde{x}=(0;0;0)}$, $\Delta n_y|_{\tilde{x}=(0;0;0)}$ – показатели преломления в центре светопроводящей жилы. Основные эффекты наблюдаются на первом цикле нагружения, поэтому были рассмотрены *I-III* и *VI* зоны выдержки (рисунок 4.21).

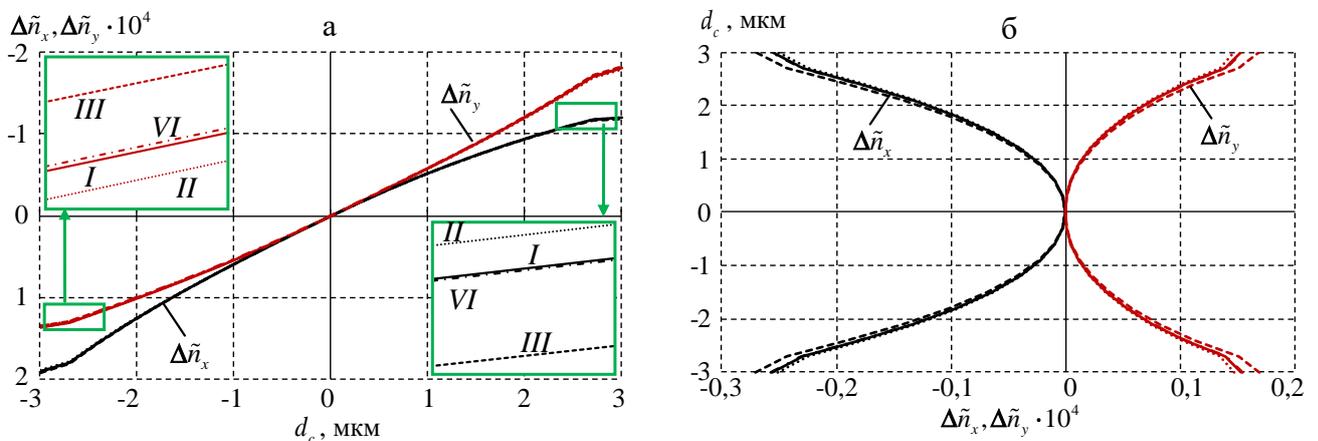


Рисунок 4.21 – Профили изменения показателей преломления при удалении от центра жилы: а – медленная ось, б – быстрая ось

Термоциклирование оказывает незначительное влияние на уровень и характер изменения показателей преломления при удалении от центра жилы. По медленной оси происходят большие изменения показателя преломления. Натяг, изгиб и характер сопряжения значительно влияет на изменения показателей преломления при удалении от центра жилы. Качественно профили показателей преломления соответствуют случаям, описанным в литературе [137,138].

По формуле (2.27) было определено модовое двулучепреломление и изменение его в термоцикле. Характер изменения совпадает с рисунком 4.11 в.

Был сделан анализ зависимости двулучепреломления от толщины внутреннего покрытия по зонам выдержки в термоцикле (рисунок 4.22). Модовое двулучепреломление жилы количественно зависит от температуры окружающей среды и изменяется в пределах 8%. Уровень параметра схож с данными Н. Li [49].

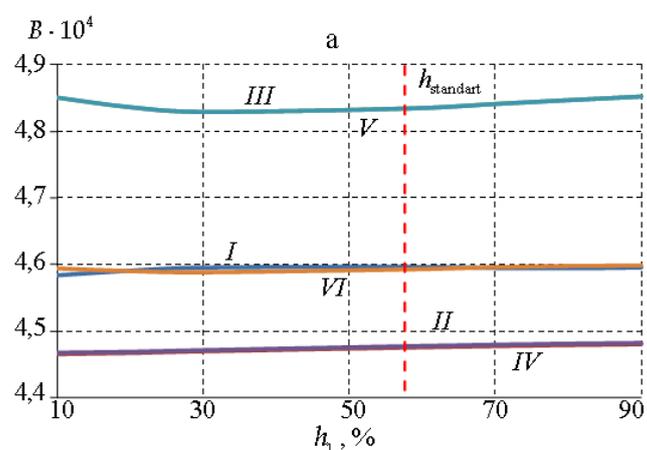


Рисунок 4.22 – Зависимость модового двулучепреломления от толщины внутреннего покрытия

Изменение B в зонах выдержки при варьировании толщины внутреннего покрытия h_1 не превышает 0,5%. В целом толщина ЗУП оказывает незначительное влияние на модовое двулучепреломление.

В рамках серии численных экспериментов установлены качественные и количественные закономерности:

- Изменение температуры во время термоцикла оказывает влияние на НДС светопроводящей жилы при всех рассматриваемых соотношениях ЗУП. Компонента σ_z изменяется на всем температурном диапазоне, а компоненты σ_x и σ_y при отрицательных температурах.

- При увеличении процентного соотношения внутреннего слоя наблюдается более нелинейный характер деформационного поведения.

– При работе оптического волокна в условиях больших амплитуд температур происходит постоянное деформирование и изменение оптических характеристик волокна, которые могут сказываться на качестве сигнала.

– Разрыв контакта волокна с катушкой происходит при разных температурах в диапазоне $4 \div 19^\circ\text{C}$, что связано с термомеханическими свойствами материалов и процентным соотношением толщин ЗУП.

– Оптимальным является соотношения толщин ЗУП в диапазоне от h_{30_70} от h_{70_30} , но требуется дополнительное исследование вблизи стандартного соотношения толщин ЗУП.

4.6 Численное моделирование технологической пробы с учетом зависимости коэффициента термического расширения от температуры

В работе А.Н. Труфанова и И.Н. Шардакова [89] для УФ-отверждаемых полимеров защитных покрытий, используемых для волокна Panda, методами натурального эксперимента были получены аналитические зависимости коэффициента теплового расширения от температуры в широком диапазоне, включающем релаксационный переход. На рисунке 4.23а приведена полученная в работе зависимость, аппроксимация кривых была сделана по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{ЗУП}_1}(T) &= 4,2387 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 3,097 \cdot 10^{-7} T^3 - 1,6507 \cdot 10^{-5} T^2 + 2,3536 \cdot 10^{-2} T + 0,1046 \\ \varepsilon_{\text{ЗУП}_2}(T) &= 3,6391 \cdot 10^{-5} T^2 + 7,9891 \cdot 10^{-3} T - 0,4892 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для использования этой зависимости при решении задачи был разработан программный модуль для расчетного пакета ANSYS Mechanical APDL, позволяющий задавать зависимость температурной деформации материалов покрытий от температуры и пересчитывать свободный коэффициент в зависимости от выбора начального ненапряженного состояния конструкции. Например, если конструкция в ненапряженном состоянии находится при 23°C , то следует выбрать значения $-0,5307$ и $-0,203$ в формулах (4.1) для внутреннего и внешнего ЗУП соответственно.

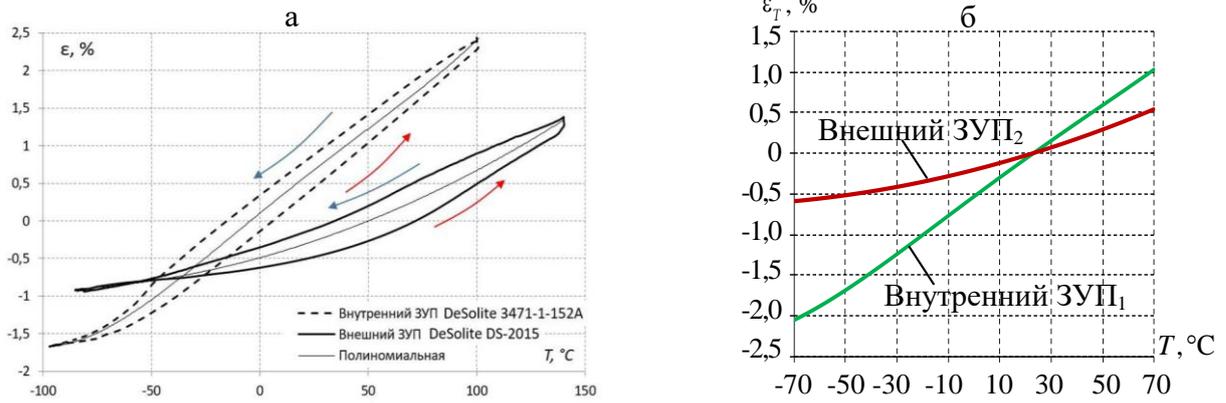


Рисунок 4.23 – Зависимость температурной деформации полимеров ЗУП от температуры: а – зависимость из работы [89], б – зависимость, принятая к расчету

Для проверки адекватности учета свойств материалов была решена тестовая задача (рисунок 4.24), в которой единичный объем со свойствами полимера подвергался воздействию температуры по закону на рисунке 4.25. Было проведено сравнение температурных деформаций, полученных по аналитической формуле (4.1) и при численном расчете. Для внутреннего покрытия разница не превышала 0,2%, а для внешнего покрытия – 1,3 %.

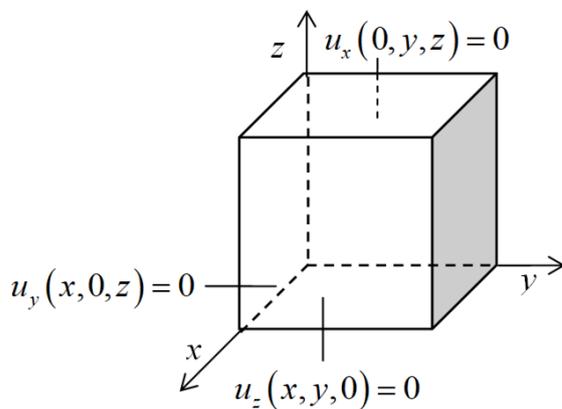


Рисунок 4.24 – Тестовая модель

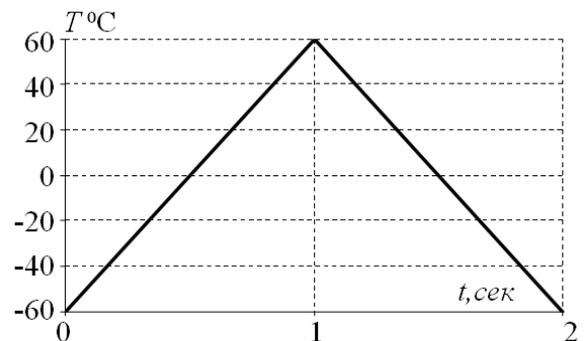


Рисунок 4.25 – Закон изменения температуры

На первом этапе моделирование задачи было проведено для двух радиусов катушек 5 и 50 мм и стандартного соотношения ЗУП. Оценка влияния переменного КТР на работу оптического волокна типа Panda была проведена по изменениям показателя преломления по осям поляризации. На рисунке 4.26 приведена эволюция изменения показателя преломления в центре светопроводящей жилы.

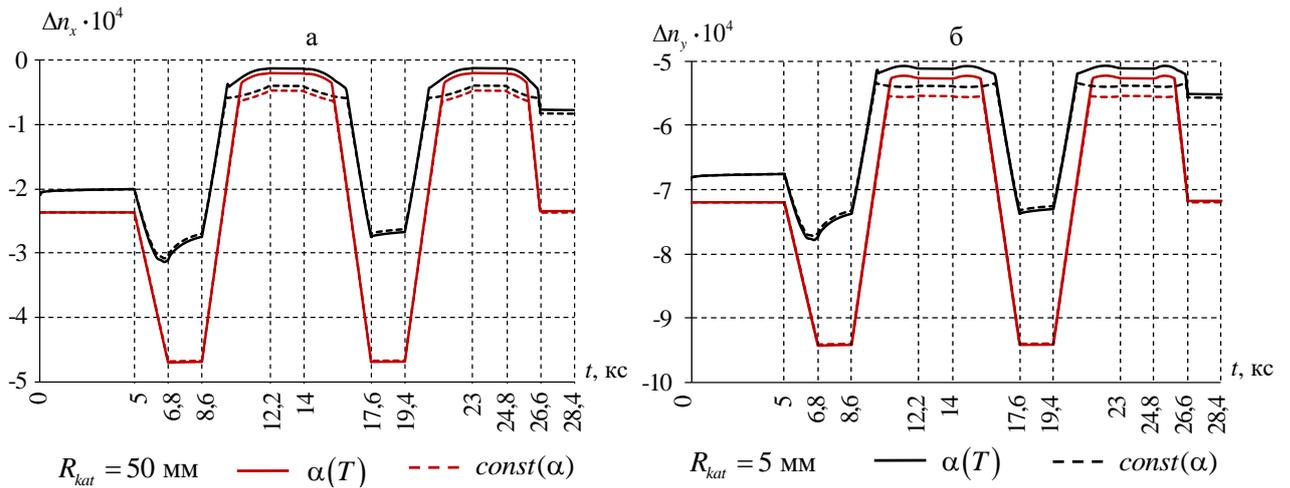


Рисунок 4.26 – Эволюция изменения показателя преломления в центре светопроводящей жилы: а – по оси x , б – по оси y

Учет зависимости переменного КТР от температуры в большей степени влияет на изменение показателя преломления при отрицательных температурах (зоны охлаждения и выдержки при -60°C), причем не зависимо от радиуса катушки. При переменном КТР значения в III и V зонах выдержки увеличились на $0,27 \cdot 10^{-4}$.

На следующем шаге была сделана оценка влияния переменного КТР для радиуса катушки 5 мм и трех соотношений ЗУП (h_{30_70} , h_{standart} , h_{70_30}) в диапазоне, выбранном нами в качестве оптимального в разделе 4.5. На рисунке 4.27 приведена эволюция изменения показателя преломления в центре светопроводящей жилы для выбранных соотношений ЗУП. При переменном КТР значения в III и V зонах выдержки увеличились на $0,45 \cdot 10^{-4}$ и $0,19 \cdot 10^{-4}$ для h_{30_70} и h_{70_30} соответственно. С уменьшением толщины внутреннего ЗУП увеличивается разница в изменении показателя преломления между моделями с постоянным КТР и КТР, зависящим от температуры. При других температурах отличие не превышает 6%. Такое поведение волокна наблюдается в условиях напряженного состояния соответствующего условиям технологической пробы, т.е. с учетом намотки, изгиба, контакта и температуры.

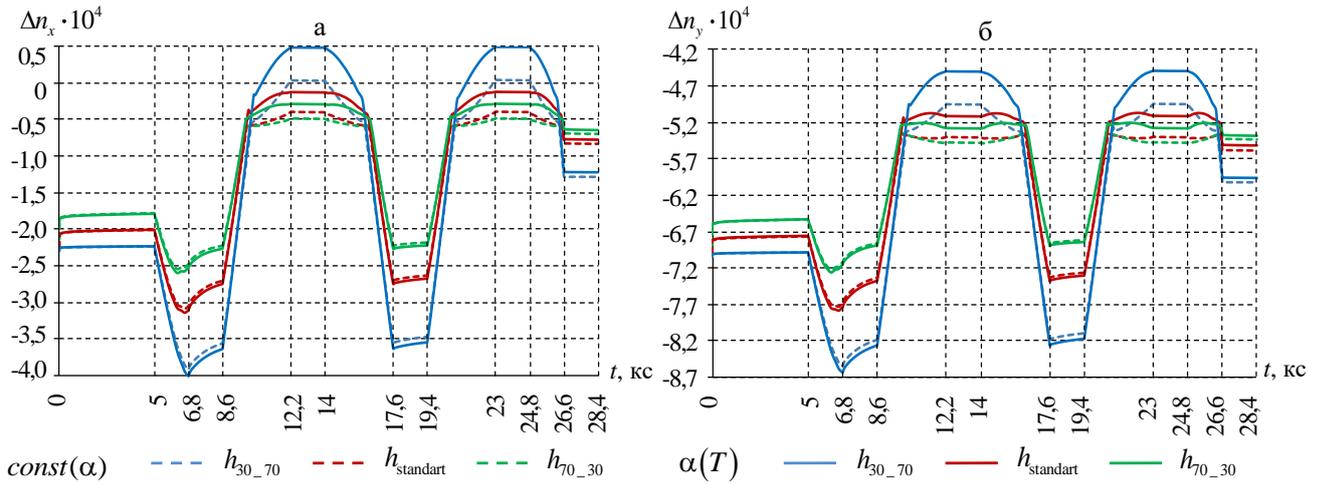


Рисунок 4.27 – Эволюция изменения показателя преломления в центре светопроводящей жилы при $R_{\text{кат}} = 5$ мм: а – по оси x , б – по оси y

В разделе 4.5 был сделан вывод, что толщина ЗУП не оказывает влияние на двулучепреломление. Разница в величине двулучепреломления в моделях без учета и с учетом зависимости КТР материалов ЗУП от температуры наблюдается в зонах выдержки при -60°C и $+60^\circ\text{C}$ и достигает максимального значения $0,247 \cdot 10^{-4}$.

4.7 Численное моделирование свободной намотки волокна типа Panda с учетом зависимости коэффициента термического расширения от температуры

В технической характеристике волокон, предоставляемой заводом изготовителем, указывают величину экстинкции в состоянии свободной намотки диаметром 100 мм при температуре 20°C (измеряется на 100 м световода).

В анизотропном одномодовом волокне по осям поляризации распространяются две основные линейно-поляризованные моды, которые имеют разные постоянные распространения. Если направление плоскости линейной поляризации входного света совпадает с одной из поляризационных осей, то и на выходе должна сохраняться поляризация света. Однако на практике в волокнах есть неоднородности, появившиеся при изготовлении или эксплуатации волокна, которые приводят к связи мод. Количественно этот процесс характеризуется коэффициентом экстинкции, который определяется для конкретной длины волокна [139]. Но этот параметр относится не только к волокну, но и к любому

оптическому устройству, измеряющему состояние поляризации света. Коэффициент экстинкции может быть вычислен для совокупности состыкованных волокон и других оптических элементов, каждый из которых имеет свою величину экстинкции [140]. Он характеризует качество оптической системы как величину возбуждения нежелательного состояния поляризации.

Производителем были предоставлены результаты экспериментов, в которых был измерен коэффициент экстинкции свободной намотки волокна типа Panda диаметром 170 мкм при изменении температуры по закону на рисунке 4.28. На рисунке 4.29 показаны приведенные к максимальному значению экспериментальные кривые экстинкции в нескольких опытах, по ним была построена средняя зависимость приведенной экстинкции (черная кривая). На участке 10 800 – 13 200 секунд происходит нагрев от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$. Здесь наблюдается пик, который можно объяснить только релаксационными процессами в ЗУП, когда внешний слой размягчается, теряет жесткость и происходит разгрузка системы.

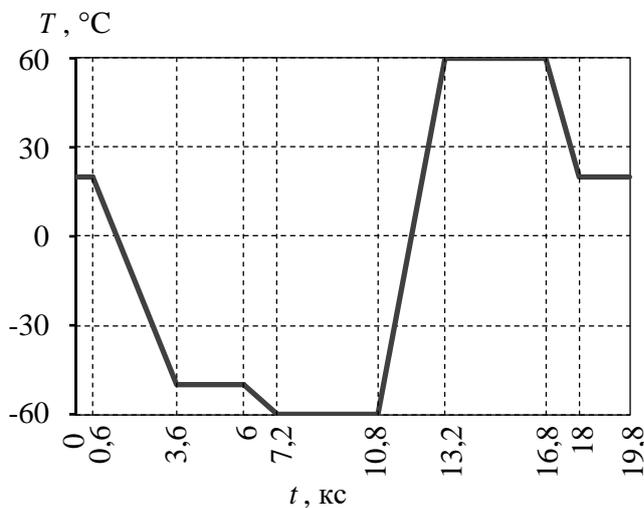


Рисунок 4.28 – Цикл изменения температуры

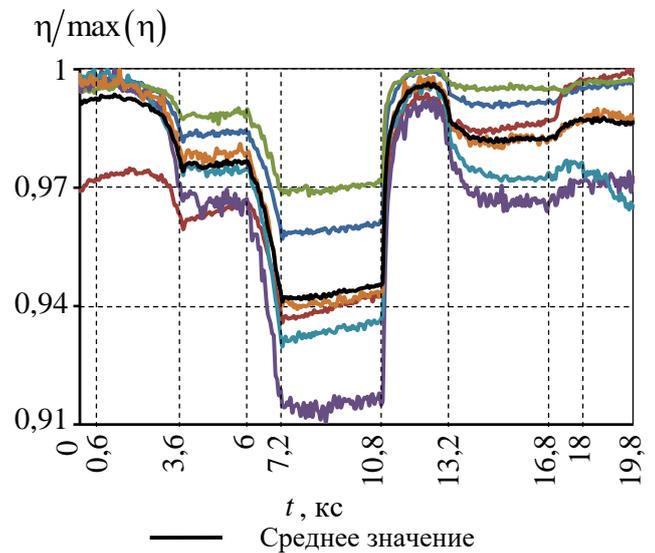


Рисунок 4.29 – Эволюция приведенной экстинкции в термоцикле

Математическая модель технологической пробы, приведенная в разделе 2.3, позволяет описать ключевой элемент этого эксперимента – свободную намотку волокна путем исключения из модели алюминиевой катушки. Но без учета

остальных элементов (температурная печь, поляризатор, анализатор, соединительные элементы и т.д.) в модель вносятся ряд неточностей. Таким образом, модель позволяет оценить качественную, но не количественную картину деформирования волокна и изменения оптических характеристик в рамках свободной намотки и термоцикла. Можно выполнить качественное сопоставление характера изменения некоторых величин, полученных по разработанной модели, с коэффициентом экстинкции. Был проведен численный эксперимент с термоциклом на рисунке 4.28, в котором отсутствовал натяг волокна и катушка, изгиб волокна моделировался по диаметру 170 мм, что соответствует натурному эксперименту. Цель моделирования – оценка влияния материалов полимерных покрытий на НДС и оптические характеристики волокна при свободной намотке. Численное моделирование было проведено для двух моделей: без учета и с учетом зависимости КТР материалов ЗУП от температуры. Параметры волокна приведены в таблице 4.1, свойства в таблице 4.2. Для модели с учетом зависимости КТР материалов ЗУП от температуры начальное ненапряженное состояние считалось при 20°C, в зависимости (4.1) свободные коэффициенты были приняты -0,463 и -0,174 для внутреннего и внешнего ЗУП соответственно. При таких внешних условиях деформирование обусловлено только температурой.

В результате решения была определена эволюция НДС в центре светопроводящей жилы. На рисунке 4.30а показаны приведенные к максимальным параметры: напряжение по оси y в численном эксперименте и экстинкция в натурном эксперименте. На рисунке 4.30б показаны напряжения по осям x и z . Характер изменения во время термоцикла напряжений по оси y коррелирует с изменением коэффициента экстинкции (рисунок 4.30а). Полученные результаты подтверждают, что на качественном уровне модель правильно описывает терморелаксационные процессы в материалах ЗУП. В условиях свободной намотки уровень напряжений меняется в пределах: σ_x – 14 МПа, σ_y – 5 МПа, σ_z – 12 МПа. По сравнению с технологической пробой (раздел 4.3) величина компонент σ_x и σ_y осталась на том же уровне, а величина σ_z

снизилась на 85%. В эволюции σ_z (рисунок 4.30б) также прослеживается нелинейность на участке нагрева до 60°C.

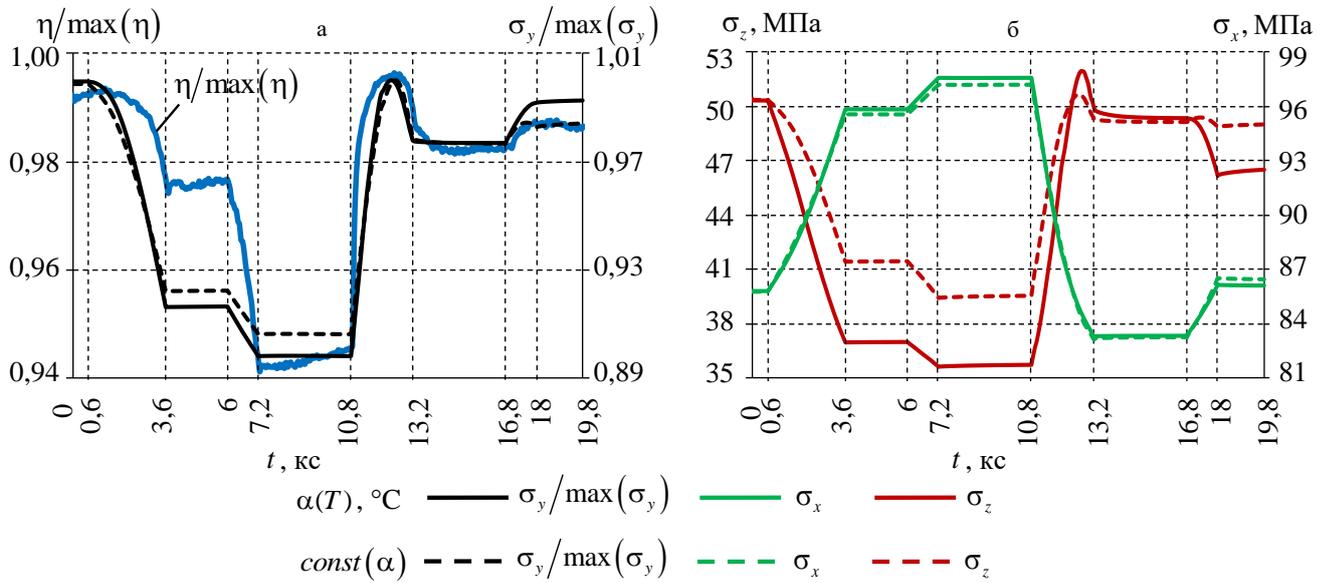


Рисунок 4.30 – Эволюция напряжения по оси у в центре светопроводящей жилы в численном эксперименте и экстинкции в натурном эксперименте

Были исследованы оптические характеристики волокна. Двулучепреломление в условиях свободной намотки в термоцикле меняется в пределах $0,355 \cdot 10^{-4}$, характер изменения и величина не зависят от КТР полимеров защитных покрытий. На рисунке 4.31 приведена эволюция изменения показателя преломления в центре светопроводящей жилы.

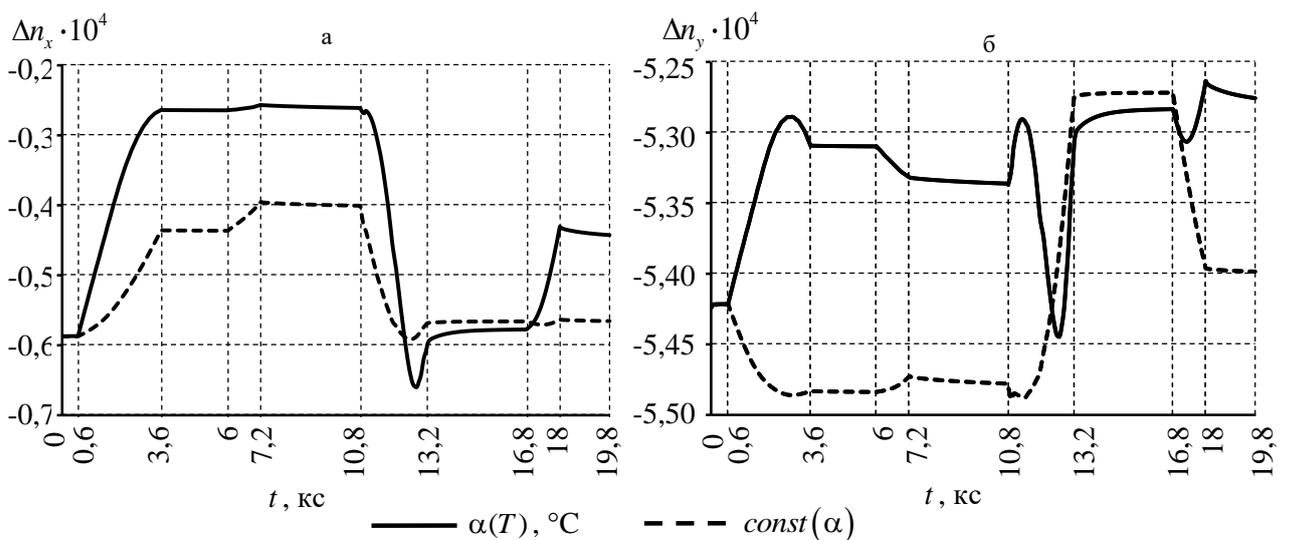


Рисунок 4.31 – Эволюция изменения показателя преломления в центре светопроводящей жилы: а – по оси x, б – по оси y

При термоциклировании наблюдается разный характер изменения показателей преломления по осям поляризации на всем температурном диапазоне. В зоне выдержки при 60°C характер изменения наиболее близкий. При свободной намотке показатель преломления изменяется не значительно по сравнению с технологической пробой (таблица 4.6).

Таблица 4.6 Амплитуды изменения показателей преломления

| Параметр | Свободная намотка, диаметр 170 мм | | Технологическая проба, $R_{kat} = 5$ мм | |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|
| | $const(\alpha)$ | $\alpha(T)$ | $const(\alpha)$ | $\alpha(T)$ |
| $\Delta n_x \cdot 10^{-4}$ | 0,196 (-0,396 ÷ -0,592) | 0,403 (-0,257 ÷ -0,660) | 2,692 (-0,397 ÷ -3,089) | 3,022 (-0,126 ÷ -3,148) |
| $\Delta n_y \cdot 10^{-4}$ | 0,217 (-5,272 ÷ -5,489) | 0,181 (-5,264 ÷ -5,445) | 2,381 (-5,348 ÷ -7,729) | 2,706 (-5,082 ÷ -7,788) |

Для первого приближения решения задачи можно пользоваться постоянным коэффициентом температурного расширения, но для более детального решения необходимо учитывать зависимость КТР полимеров защитных покрытий от температуры.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В главе рассмотрено влияние термосилового воздействия на оптическое волокно типа Panda в условиях технологической пробы. Исследования выполнены в широком диапазоне температур. Рассмотрено два витка термоцикла с выдержками при температурах 23, 60 и -60 °C. Определено и приложено поле остаточных напряжений в волокне, сформированное в процессе вытяжки. Волокно типа Panda рассматривается с учетом двухслойного вязкоупругого полимерного покрытия в условиях намотки с натягом на алюминиевую катушку в рамках контактной задачи вязкоупругости.

Исследован характер сопряжения защитно-упрочняющего покрытия и оптического волокна в модели технологической пробы, выбрана модель с идеальным контактом.

Рассмотрено три варианта радиуса катушки для анализа влияния изгиба на поведение волокна. Наблюдается ассиметричный характер распределения компонент тензора напряжений по сечению волокна. Максимальный уровень σ_z при катушке 5 мм увеличивается примерно в 2,5 раза по сравнению с остаточными напряжениями. При уменьшении радиуса катушки наблюдается увеличение максимального контактного давления на границе волокно-катушка, отрыв волокна от катушки происходит при более высокой температуре. При катушке 5 мм наблюдаются нелинейное поведение показателей преломления, что связано релаксационными переходами в ЗУП. Данного эффекта не наблюдается при больших радиусах катушки. Характер изменения двулучепреломления в рамках термоцикла не зависит от радиуса катушки.

Исследованы несовершенства геометрии волокна в виде несоосности центра волокна и светопроводящей жилы и изменения соотношения толщин покрытий на деформационные и оптические характеристики системы. Отклонение жилы по оси x приводит к увеличению двулучепреломления, а по оси y наоборот к его уменьшению для приведенной ориентации силовых стержней. Отклонение по оси y более чувствительно к изменению температуры.

При исследовании соотношений толщин покрытий при сохранении внешнего диаметра ЗУП было выявлено, что изменение температуры во время термоцикла оказывает влияние на НДС светопроводящей жилы при всех рассматриваемых соотношениях ЗУП. Компонента σ_z изменяется на всем температурном диапазоне, а компоненты σ_x и σ_y при отрицательных температурах. При увеличении процентного соотношения внутреннего слоя наблюдается более нелинейный характер деформационного поведения. При работе оптического волокна в условиях больших амплитуд температур происходит постоянное деформирование и изменение оптических характеристик волокна, которые могут сказываться на качестве сигнала. Оптимальным является соотношения толщин ЗУП в диапазоне от h_{30_70} от h_{70_30} .

Для модели технологической пробы и модели свободной намотки волокна было проведено сравнение результатов расчета с постоянными и зависящими от температуры КТР полимеров защитных покрытий. Было установлено, что учет зависимости КТР от температуры в модели технологической пробы в большей степени влияет на изменение показателя преломления при отрицательных температурах при любом радиусе катушки. С уменьшением толщины внутреннего ЗУП увеличивается разница в изменении показателя преломления между моделями с постоянным КТР и КТР, зависящим от температуры. При других температурах отличие не превышает 6%.

В модели свободной намотки характер изменения во время термоцикла напряжений σ_y коррелирует с изменением коэффициента экстинкции. Полученные результаты подтверждают, что на качественном уровне модель правильно описывает терморелаксационные процессы в материалах ЗУП. При термоциклировании наблюдается разный характер изменения показателей преломления по осям поляризации на всем температурном диапазоне.

Анализ результатов всех исследований показал, что радиус намотки, температура, термомеханические свойства материалов и геометрия защитных покрытий оказывают влияние на характер изменения и уровни параметров НДС и оптические характеристики волокна. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости учета полимерных защитных покрытий в моделях оптических волокон при исследовании их работы в разных силовых и температурных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в работе исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1. Выполнена постановка задач изготовления заготовок силовых стержней и технологической пробы с учетом особенностей технологического процесса, отличающаяся учетом широкого диапазона температур и термовязкоупругих свойств материалов конструкции.

2. Разработана математическая модель термомеханического поведения заготовок силового стержня для анализа условий разрушения, отличающаяся учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений с возможностью моделирования отжига.

3. Разработана методика выбора и определен критерий прочности заготовки силового стержня, на основе анализа количественных значений критериальных характеристик, полученных в рамках комплексного численно-экспериментального исследования.

4. Разработана математическая модель с физическими соотношениями теории вязкоупругости волокна типа Panda в полимерном защитно-упрочняющем покрытии с учетом технологических напряжений, изгиба, натяга, контактного взаимодействия и релаксационных процессов в полимерах.

5. Установлены новые закономерности влияния защитно-упрочняющего покрытия на оптические характеристики волокна Panda в условиях термосилового воздействия и сложного напряженно-деформированного состояния на основе комплексного исследования с применением вычислительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труфанов, А.Н. 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 = Computational continuum mechanics. – 2016. – Т. 9. – № 1. – С. 97-108. (ВАК)
2. 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. (ВАК)
3. Лесникова, Ю.И. Исследование оптико-механических характеристик волокна в условиях термоцикла / Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, О.Ю. Сметанников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6(2). – С. 255-260. (ВАК)
4. Лесникова, Ю.И. Анализ влияния двухслойного защитно-упрочняющего покрытия на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 49–61. (ВАК)
5. Лесникова, Ю.И. Математическое моделирование контактного взаимодействия оптического волокна типа PANDA с алюминиевым полупространством при разном характере сопряжения элементов / Ю.И. Лесникова, А.А. Каменских, М.М. Пащенко // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2022. – № 3. – С. 45-65. (ВАК)
6. 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. – Vol. 177: Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016, 2729 October 2016, Tomsk, Russian Federation. – Art. 012116. 5 p. (WoS, Scopus)

7. Lesnikova, Y.I. The effect of contact influence on the opticomemchanical properties of Panda-type fiber under thermocycling conditions / Y.I. Lesnikova, A.N. Trufanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1129. – Art. 012023. 6 p. (WoS, Scopus)

8. 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. – Vol.14. – Art. 3840. 19 p. (WoS, Scopus)

9. Лесникова, Ю.И. Анализ влияния конструкционных параметров и свойств материалов оптического волокна на деформационные и оптические параметры конструкции // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тез. докл. XVI Всерос. шк.-конф. молодых ученых, 14–17 марта 2022 г., Новосибирск / Сиб. отд-ние РАН, Ин-т теорет. и прикл. механики им. С.А. Христиановича, Центр. аэрогидродинам. ин-т им. проф. Н. Е. Жуковского. - Новосибирск: Параллель, 2022. - С. 83-84.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669739 «Трехточечный изгиб заготовок силовых стержней анизотропных оптических волокон типа Panda» /Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.А. Каменских. – Заявка №2022669657. Дата поступления 25.10.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.10.2022.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669757 «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. – Заявка №2022669685. Дата поступления 25.10.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.10.2022.

12. Renaudier, J. Scaling capacity growth of fiber-optic transmission systems using 100+nm ultra-wideband semiconductor optical amplifiers / J. Renaudier, A. Ghazisaeidi // J. Lightwave Technol. – 2019. – Vol. 37. – P. 1831-1838.

13. Kwon, S. Recent progress of fiber shaped lighting devices for smart display applications – A fibertronic perspective / S. Kwon, Y.H. Hwang, M. Nam, H. Chae,

H. S. Lee, Y. Jeon, S. Lee, C.Y. Kim, S. Choi, E.G. Jeong, K.C Choi // *Adv. Mater.* – 2020. – Vol. 32(5). – Art. 1903488.

14. Yuexia L., Longyu X., Jinyue Y., Jinpeng B. Design of a hybrid fiber optic daylighting and PV solar lighting system / L. Yuexia, X. Longyu, Y. Jinyue, B. Jinpeng // *Energy Procedia.* – 2018. – Vol. 145. – P. 586-591.

15. Pevec, S. Multiparameter fiber-optic sensors: a review / S. Pevec, D. Donlagić // *Opt. Eng.* – 2019. – Vol. 58(7). – Art. 072009.

16. Alemohammad, H. Opto-mechanical fiber optic sensors: Research, technology, and applications in mechanical sensing. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 342 p.

17. Wang, Y. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film / Y. Wang, Q. Huang, W. Zhu, M. Yang, E. Lewis // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26. – P. 1910-1917.

18. Прохоров, А.Е. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков / А.Е. Прохоров, О.А. Плехов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2019. – №1. – С. 131-139.

19. Chen, M. Hybrid MEFPI/FBG sensor for simultaneous measurement of strain and magnetic field / M. Chen, Y. Zhao, R. Lv, F. Xia // *Opt. Fiber Technol.* – 2017. – Vol. 39. – P. 32-36.

20. Chen, W.P. Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement / W.P. Chen, D.N. Wang, B. Xu // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – Art. 368.

21. Zhang, S. A miniature SMS-LPG bending sensor with high sensitivity based on multimode fiber embedded-LPG / S. Zhang, S. Deng, Z. Wang, C. Sun, X. Chen, Y. Ma, L. Zhao, C. Lu, T. Geng, W. Yang, L. Yuan // *Sens. Actuator A Phys.* – 2019. – Vol. 295. – P. 31-36.

22. Янукович, Т.П. Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна / Т.П. Янукович, А.В. Поляков //

Приборы и методы измерений. – 2019. – №3. – С. 243-252.

23. Eltzov E., De Cesarea A.L., Low A.Y.K., Marks R.S. Indoor air pollution and the contribution of biosensors / E. Eltzov, A.L. De Cesarea, A.Y.K. Low, R.S. Marks // *The EuroBiotech Journal*. – 2019. – Vol. 3(1). – P. 19-31.

24. Yin, M. Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications / M. Yin, B. Gu, Q.-F. An, C. Yang, Y.L. Guan, K.-T. Yong // *Coord. Chem. Rev.* – 2018. – Vol. 376. – P. 348-392.

25. Morris, T. A. Broadened-laser-driven polarization-maintaining hollow-core fiber optic gyroscope / T. A. Morris, M. J. F. Digonnet // *J. Lightwave Technol.* – 2020. – Vol. 38 (4). – P. 905-911.

26. Chopra K.N. Optoelectronic Gyroscopes. Progress in Optical Science and Photonics. – Springer, 2021. – Vol. 11. – 138 p.

27. Zhang, T. A review of photonic crystal fiber sensor applications for different physical quantities / T. Zhang, Y. Zheng, C. Wang, Z. Mu, Y. Liu, J. Lin // *Appl. Spectrosc. Rev.* – 2018. – Vol. 53(6). – P. 486-502.

28. Wu, B. Optical fiber hydrogen sensor with single Sagnac interferometer loop based on vernier effect / B. Wu, C. Zhao, B. Xu, Y. Li // *Sens. Actuator B Chem.* – 2018. – Vol. 255 (3). – P. 3011-3016.

29. Esposito, F. Multi-parameter sensor based on single long period grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain / F. Esposito, A. Srivastava, A. Iadicicco, S. Campopiano // *Opt. & Laser Technol.* – 2019. – Vol. 113. – P. 198-203.

30. He, X. Metallic structure functional sensor based on embedded Panda fiber by ultrasonic additive manufacturing / X. He, C. Ma, X. Wang, Z. Wang, F. Jiang, L. Yuan // *Appl. Opt.* – 2020. – Vol. 59(16). – P. 4880-4887.

31. Бурков, В.Д. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники / В.Д. Бурков, Г.А. Иванов. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 222 с.

32. Alam, M. Small form-factor PANDA-type HiBi fiber for sensing applications / M. Alam, D. Guertin, J. Farroni, J. Abramczyk, N. Jacobson,

K. Tankala // Proc. SPIE, Industrial and Highway Sensors Technology. – 2004. – Vol.5272

33. Гроднев, И.И. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник / И.И. Гроднев, А.Г. Мурадян, Р.М. Шарафутдинов и др. – М.: Радио и связь, 1993. – 264 с.

34. Богатырев, В.А. Высокопрочные волоконные световоды, изготовленные методом химического осаждения из газовой фазы / В.А. Богатырев, М.М. Бубнов, Вечканов Н.Н., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М., А.С. Конов, С.В. Лаврищев, А.Ю. Лаптева // Квантовая электроника. – 1982. – Т.9, №7. – С.1503-1509.

35. Dianov, E.M. Germania-Based Core Optical Fibers / E.M. Dianov, V.M. Mashinsky // Journal of Lightwave technology. – 2005. – Vol. 23, № 11. – P. 3500-3508.

36. Гурьянов, А.Н. Разработка и исследование одномодовых волоконных световодов с высоким содержанием GeO_2 и малыми оптическими потерями / А.Н. Гурьянов, М.Ю. Салганский, В.Ф. Хопин, М.М. Бубнов, М.Е. Лихачев // Неорганические материалы. – 2008. – Т. 44, №3. – С. 331-338.

37. Бубнов, М.М. Легирование фтором кварцевого стекла в процессе получения заготовок волоконных световодов методом MCVD / М.М. Бубнов, А.Н. Гурьянов, М.Ю. Салганский, С.Л. Семенов, В.Ф. Хопин // Фотон-экспресс. – 2017. – № 6 (142) . – С. 280-281.

38. Tomashuk, A.L. Comparison study of radiation-resistant polarization-maintaining Panda fibers with undoped- and n-doped-silica core / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, S.L. Semjonov, A.V. Filippov, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, I.S. Azanova, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, N.V. Zavyalov, E.A. Pospelova, T.V. Dimakova, V.V. Voloshin, I.L. Vorob'ev, A.O. Kolosovskii, Y.K. Chamorovskiy // Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Vol. 38, № 20. – Pp. 5817-5824.

39. Буреев, С.В. Технология крупногабаритных заготовок анизотропных одномодовых световодов с эллиптической оболочкой / С.В. Буреев,

К.В. Дукельский, М.А. Ероньян, П.А.Злобин, А.В. Комаров, Л.Г. Левит, В.И. Страхов, А.В. Хохлов // Оптический журнал, 2007. – Т. 74, №4. – С. 85-87.

40. Kulesh, A. Crystallization of quartz glass fibers during the drawing process / A. Kulesh, M. Eronyan., I. Meshkovskii, V. Zolotarev, M. Bisyarin, M. Tsibinogina // Crystal Growth and Design. – 2015. – Vol. 15, № 6. – P. 2831-2834.

41. Dukel'skii, K.V .Increasing polarization stability of anisotropic single-mode quartz light guides with elliptical stress cladding / K.V. Dukel'skii, M.A. Eron'yan, A.V. Komarov, E.I. Romashova, E.V. Ter-Nersesyants, K. Meshkovskii, A.Yu. Kulesh// Journal of Optical Technology. – 2016. – Vol. 83, № 12. – P. 783-784.

42. Патент №2764240 С1 Рос. Федерации, G02B 6/02 (2006.01) C03B 37/01 (2006.01). Способ изготовления анизотропных одномодовых волоконных световодов / М.А. Ероньян, А.А. Реуцкий, А.А. Унтилов; заявитель и патентообладатель АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»»; опубл. 14.01.2022.

43. Мухтубаев, А.Б. Влияние значения температуры на величину h -параметра в двулучепреломляющих волокнах / А.Б. Мухтубаев, С.М. Аксарин, Е.Э. Калугин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, № 1.– С. 21-26.

44. Mukhtubayev, A.B. Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber / A.B. Mukhtubayev, S.M. Aksarin, V.E. Strigalev // Optical Fiber Technology. – 2017. – Vol. 38. – P. 119-122.

45. Азанова, И.С. Влияние напряженно-деформированного состояния оптического волокна на радиационно-наведенное затухание после воздействия импульсного гамма-излучения / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, Е.А. Ладыжец, А.Б. Волынцев, А.В. Филиппов // Фотон-экспресс. – 2021. – № 6 (174). – С. 26-27.

46. Богачков, И.В. Исследование влияния структуры оптических волокон на характеристики акустооптического взаимодействия / И.В. Богачков,

В.А. Майстренко, Н.И. Горлов // Динамика систем, механизмов и машин.– 2021. – Т. 9, № 3. – С. 86-94.

47. Богачков, И.В. Изучение свойств рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах, сохраняющих состояние поляризации / И.В. Богачков // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 101-106.

48. Zhang, Y. Investigation of heat source position and fiber coil size for decreasing the FOG scale factor temperature error / Y. Zhang, X. Li, C. Liu, H. Li, S. Du // Optik. – 2020. – Vol. 204. – Art. 164203.

49. Li, M. Design of ultrahigh birefringent stress-induced polarization-maintaining fiber with hole-assistance / M. Li, X. Li, H. Li // Optical Fiber Technology. – 2021. – Vol. 67. – Art. 102707.

50. Park, Y. Characterization of a stress-applied polarization-maintaining (PM) fiberthrough photoelastic tomography / Y. Park, U.C. Paek, D.Y. Kim // J. Lightwave Technol. – 2003. Vol. 21. – P. 997-1004.

51. Дяченко, А.А. Модель разрушения кварцевого стекла и световодов / А.А. Дяченко, О.Е. Шушпанов // Нелинейный мир. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 34-54.

52. Дяченко, А.А. Влияние тепловой истории стекол на их прочностные характеристики / А.А. Дяченко, О.Е. Шушпанов // Нелинейный мир. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 26-44.

53. Семенов, С.Л. Прочность волоконных световодов на основе кварцевого стекла при различных скоростях нагружения и возможность ее диагностики // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – № 9.– С. 33-41.

54. Богатырев, В.А. Механическая надежность волоконных световодов / В.А. Богатырев, М.М. Бубнов, С.Д. Румянцев, С.Л. Семенов // Волоконная оптика. Труды ИОФАН. – 1990. – Т. 23. – С.66-93.

55. Булатов, М.И. Разрушение кварцевых оптических волокон с различными защитными покрытиями / М.И. Булатов, А.А. Шацов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 47-52.

56. Булатов, М.И. Трещиностойкость, прочность и динамическая усталость кварцевых волокон с медными покрытиями / М.И. Булатов, А.А. Шацов, Н.С. Григорьев, Н.А. Мальков // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2022. – Т. 16, № 1. – С. 57-65.
57. Kurkjian, C.R. The strength of silicate glass: what do we know, what do we need to know / C.R. Kurkjian, P.K. Gupta, R.K. Brow // Int. J. Appl. Glas. Sci. – 2010. – №1 (1). – P. 27-37.
58. Tang, Z. Using the two-point bend technique to determine failure stress of pristine glass fibers / Z. Tang, N.P. Lower, P.K. Gupta, C.R. Kurkjian, R.K. Brow // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2015. – Vol. 428. – P. 98-104
59. Kurkjian, C.R. Intrinsic strength and the structure of glass. / C.R. Kurkjian, P.K. Gupta // Physics and Chemistry of Glasses: European Journal of Glass Science and Technology Part B. – 2020. – Vol. 61, №6. – P. 239-247.
60. Glaesemann, G. S. Optical fiber mechanical reliability //White Paper. – 2017. – Vol. 8002. – P. 1-62.
61. Tsai, K.-H. General solutions for stress-induced polarization in optical fibers / K.-H. Tsai, K.-S. Kim, T.F. Morse // Journal of Lightwave Technology. –1991. – Vol. 9. – P. 7-17.
62. Guan, R. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers / R. Guan, F. Zhu, Z. Gan, D. Huang, S. Liu // Optical Fiber Technology. – 2005. – №.11. – P.240-254.
63. Liu, J. Analytical Estimation of Stress-Induced Birefringence in Panda-Type Polarization-Maintaining Fibers / J. Liu; Y. Liu; T. Xu // IEEE Photonics Technology Letters. – 2020. – Vol. 32, №24. – P.1507-1510.
64. Мазурин, О.В. Стеклование. – Л.: Наука, 1986. – 157 с.
65. Бартнев, Г.М. Релаксационные свойства полимеров / Г.М. Бартнев, А.Г. Бартнева. – М.: Химия, 1992. – 384 с.
66. Бартнев, Г.М. Релаксационные процессы в стеклообразующих системах / Г.М. Бартнев, Д.С. Сандисов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 259 с.

67. Kaminow, I.P. Single-polarization optical fibers: Slab model / I.P. Kaminow, V. Ramaswamy // *Appl. Phys. Lett.* – 1979. – Vol.34. – P. 268-270.
68. Okamoto, K. Stress analysis of optical fibers by a finite element method / K. Okamoto, T. Hosaka, T. Edahiro // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1981. – Vol. QE-17. – P. 2123-2129.
69. Дианов, Е. М. Упругие напряжения в заготовках для стеклянных волоконных световодов / Е.М. Дианов, В.М. Машинский // *Квантовая электроника.* – 1978. – Т.5, №11. – С. 2463–2466.
70. Liu, Y. Analysis of the birefringence properties of optical fibers made by a preform deformation technique / Y. Liu, B.M.A. Rahman, K.T.V. Grattan // *Journal of Lightwave Technology.* – 1995. – Vol. 13, № 2. – P. 142-147.
71. Fontaine, M. Computations of optical birefringence characteristics of highly eccentric elliptical core fibers under various thermal stress conditions // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 75, № 1. – P. 68-73.
72. Sakai, J. Birefringence caused by thermal stress in Elliptically deformed core optical fibers / J. Sakai, T. Kimura // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1982. – Vol. QE-18, № 11. – P. 1899-1909.
73. Ильюшин, А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А. Ильюшин, Б.Е. Победря. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
74. Бугаков, И.И. Феноменологические модели стеклюющихся полимерных тел // *Труды Всесоюзн. симпозиума по остаточным напряжениям.* – 1982. – С. 110-114.
75. Бугаков, И.И. Определяющие уравнения для материалов с фазовым переходом // *Механика твердого тела.* – 1989. – №3. – С. 111-117.
76. Shaffer, B.W. Thermoelastic Constitutive Equation for Chemically Hardening Materials / B.W. Shaffer, M. Lewitsky // *Journal of Appl. Mech.* – 1974. – Vol. 41, № 3. – P. 652-657.
77. Lewitsky, M. Residual Thermal Stresses in a Solid Sphere Cast From a Thermosetting Material / M. Lewitsky, B.W. Shaffer // *Journal of Appl. Mech.* – 1975. – Vol. 42, №9. – P. 651-655.

78. Сметанников, О.Ю. Определяющие соотношения термомеханического поведения полимерных материалов в условиях стеклования и размягчения / О.Ю. Сметанников, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков // Известия РАН. Механика твердого тела. – 1997. – № 3. – С.106-114.

79. Мендес, А. Справочник по специализированным оптическим волокнам: пер. с англ. / А. Мендес, Т. Ф. Морзе. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.

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

81. Бартенев, Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. – М.: Стройиздат, 1974. – 240 с.

82. Пух, В.П. Прочность и разрушение стекла – Л.: Наука, 1973. – 155 с.

83. Lezzi, P.J. Surface Crystallization and Water Diffusion of Silica Glass Fibers: Causes of Mechanical Strength Degradation / P.J. Lezzi, E.E. Evke, E.M. Aaldenberg, M. Tomozawa // J. Am. Ceram. Soc. – 2015. – Vol. 98, №8. – P. 2411-2421.

84. El Abdi, R. Influence of environment atmosphere on optical fiber strength / R. El Abdi, R. Leite Pinto, G. Guérard, C. Capena // International Journal of Mechatronics & Applied Mechanics. – 2022. – Vol. 11. – P. 41-43.

85. Petrie, C. Embedded metallized optical fibers for high temperature applications / C. Petrie, N. Sridharan, M. Subramanian, A. Hehr k, M. Norfol, J. Sheridan // Smart Mater. Struct. – 2019. – Vol. 28, №5. – Art. 055012.

86. Romashova, V.B. Research of optical fiber's hermetic carbon coatings used in harsh conditions / V.B. Romashova, D.S. Shaimadiyeva, N.V. Burov // Photonics. – 2019. – Vol. 13(5). – P. 476-484.

87. Zhang, Y. Synthesis and characterization of high-temperature-resistant and optically transparent polyimide coatings for potential applications in quartz optical fibers protection/ Y. Zhang, L. Qu, J. Liu, X. Wu, Y. Zhang, R. Zhang, H. Qi, X. Zhang // J. Coat. Technol. Res. – 2019. – Vol. 16. – P. 511–520.

88. Goicoechea, J. Coatings for Optical Fiber Sensors / J. Goicoechea, M. Hernaez, C. Zamarreño, F. Arregui // *Comprehensive Materials Processing*. – 2014. – Vol. 13. – P. 103-119.

89. Shardakov, I.N. Identification of the Temperature Dependence of the Thermal Expansion Coefficient of Polymers / I.N. Shardakov, A.N. Trufanov // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13(18). – Art. 3035.

90. 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. – С. 355–358.

91. Hopf, B.A. Three-Dimensional-FEM Model With Experimentally Determined Material Parameters of an FBG Sensor Element in a Panda-Type Fiber / B. Hopf, B. Fischer, M. Lindner, A.W. Koch, J. Roths // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Vol. 36, №4. – P. 1076-1083.

92. Wong, D. Effect of fiber coating on temperature sensitivity in polarimetric sensors // *Journal of Lightwave Technology*. – 1992. – Vol. 10, № 6. – P. 842-846.

93. Ruffin, P.B. Sensitivity of polarization-maintaining fibers to temperature variations / P.B. Ruffin, C.C. Sung // *In Proc. SPIE: Sensors and Sensor Systems for Guidance and Navigation*. – 1991. – Vol. 1478. – P.160-167.

94. Ruffin, P.B. Temperature effect on the performance of polarization-maintaining fibers/ P.B. Ruffin, C.C. Sun // *Optical Engineering*. – 1993. – Vol. 32, №. 3. – P. 476-480.

95. Gillooly, A. Next generation optical fibers for small diameter fiber optic gyroscope (FOG) coils / A. Gillooly, M. Hill, T. Read, P. Maton // *In Proc. 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, Karlsruhe, Germany, 19-20 September 2017. – P. 1-16.

96. Мальков, Н.А. Прочность оптических волокон с органическими покрытиями после воздействия аммиака / Н.А. Мальков, М.И. Булатов, И.С. Азанова // *Вестник Пермского университета. Физика*. – 2022. – №1. – С. 16-21.

97. Lesiak, P. Numerical analysis of stress distribution in embedded highly birefringent PANDA fibers / P. Lesiak, T. Woliński // 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. – SPIE, 2015. – Vol. 9634. – P. 808-811.

98. Есипенко, И.А. Построение и верификация модели нестационарного теплового воздействия на контур волоконнооптического гироскопа с целью минимизации его теплового дрейфа: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06/ Есипенко Иван Александрович; – Санкт-Петербург, 2017. – 103 С.

99. Савин, М.А. Математическое моделирование дрейфа волоконно-оптического гироскопа в условиях внешних воздействий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18/ Савин Максим Анатольевич; – Пермь, 2018. – 172 С.

100. Kyselak, M. Sensitivity and dynamic phase response to thermal radiation of a polarization-maintaining fiber / M. Kyselak, F. Dvorak, J. Maschke, C. Vlcek // *Optica Applicata*. – 2018. – Vol. 48, №. 2. – P. 249-261.

101. Wang, H. Effect of Temperature and Bending on PANDA Polarization-maintaining Fibers Fabricated by PCVD Method / H. Wang, F Tu., J. Li, H. Wei; S. Wang. // 2008 IEEE PhotonicsGlobal@Singapore. – 2008. – P. 1-4.

102. Калугин, Е.Э. Исследование влияния диаметра изгиба на величину оптических потерь и h -параметра в двулучепреломляющих волокнах / Е.Э. Калугин, А.Б. Мухтубаев, С.М. Аксарин // Сборник трудов XI Международной конференции Фундаментальные проблемы оптики – 2019. – С. 359-362.

103. Bogachkov, I.V. Researches of bend influences on Brillouin reflectograms of different types of optical fibers // *T-Comm*. – 2019. – Vol. 13, № 3. – P. 75-79.

104. Хисамов, Д.В. Влияние радиуса изгиба на долговечность оптических волокон типа «Панда» / Д.В. Хисамов, А.Н. Смирнова, И.С. Азанова // Вестник Пермского университета. Физика. – 2021. – № 4. – С. 52-57.

105. Luan, X. Design, preparation, and properties of a boron nitride coating of silica optical fiber for high temperature sensing applications / X. Luan, X. Xu, M. Li, R. Yu, Q. Zhang, S. Zhang, L. Cheng // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 850. – P. 156782.

106. Булатов, М.И. Исследование влияния отрицательных температур на оптические потери волоконного световода в защитно-упрочняющем покрытии на основе полиамидокислоты / М.И. Булатов, И.С. Азанова, А.Ф. Косолапов, А.Н. Смирнова, И.Д. Саранова // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – Т. 46, № 9. – С. 9-13.

107. Бартенев, Г.М. Строение и механические свойства неорганических стекол. – М.: Стройиздат, 1966. – 216 с.

108. Леко, В.К. Свойства кварцевого стекла / В.К. Леко, О.В. Мазурин. – Л.: Наука, 1985 г. – 166 с.

109. Демкина, Л.И. Исследование зависимости свойств стекол от их состава. – М.: Оборонгиз, 1958. – 239 с.

110. Аппен, А.А. Химия стекла. – Л.: Химия, 1974. – 351 с.

111. Лунин, Б.С. О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол / Б.С. Лунин, С.Н. Торбин // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2000. – Т. 41, №3. – С. 172-173.

112. Андреев, Ю.П. Физикотехнические свойства кварцевых стекол для оболочек источников высоко интенсивного света / Ю.П. Андреев, Р.В. Бронковская, Н.А. Воскресенская. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1976. – 76 с.

113. Труфанов, А.Н. О модели термомеханического поведения кварцевых стекол и конструкций из них / А.Н. Труфанов, И.Г. Наймушин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2010. – №. 3. – С. 85-99.

114. Клюев, В.П. Синтез и свойства стекол системы $P_2O_5-SiO_2$ / В.П. Клюев, А.Е. Мальшиков // Физ. и хим. стекла. – 1989. – Т. 15, №5. – С. 746-748.

115. Иванов, Г.А. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие / Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 171 с.

116. Труфанов, А.Н. Математическое моделирование технологических и остаточных напряжений в анизотропных оптических волокнах: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04/ Труфанов Александр Николаевич; – Пермь, 2003. – 98 с.

117. Сметанников, О.Ю. Модели механического поведения материалов и конструкций в технологических процессах с терморелаксационным переходом: дис. ... д-р. техн. наук: 01.02.04/ Сметанников Олег Юрьевич; – Ижевск, 2010. – 413 с.

118. 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.

119. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. Пер. с англ. А.С. Алексеева и др.; Пол ред. А.Ф. Смородина. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.

120. 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. – P. 95-130.

121. Williams, M.L. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids / M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry // Journal of the American Chemical Society. – 1955. – Vol. 14, №77. – P. 3701-3707.

122. Черненко, В.Д. Оптомеханика волоконных световодов: учебное пособие / В.Д. Черненко. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.

123. Chen, T. Determining a Prony series for a viscoelastic material from time varying strain data //US Army Research Laboratory. – 2000. – 26 p.

124. Бутаев, А.М. Прочность стекла. Ионнообменное упрочнение: монография / А. М. Бутаев. – Махачкала, 1997. – 252 с.

125. Подстригач, Я.С. Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций / Я.С. Подстригач, В.А. Осадчук, А.М. Марголин; АН УССР, Ин-т прикл. пробл. механики и математики, Киев: Наук. думка, 1991.– 296 с.

126. 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.Yu. Smetannikov, N.A. Trufanov // *Optical Fiber Technology*. – 2010. – Vol. 16, №3. – P. 156–161.

127. Солнцев, С.С. Разрушение стекла / С.С. Солнцев, Е.М. Морозов. – ЛКИ, 2008. –152 с.

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

129. 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.

130. Ahmed, K. Borophosphosilicate glass crystal induction and suppression / K. Ahmed, C. Geisert // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 1992. – Vol. 10, №. 2. – P. 313-315.

131. Пивинский, Ю. Е. Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 9. Влияние щелочных добавок на кристаллизацию и тепловое расширение материалов после неизотермического нагрева // *Новые огнеупоры*. – 2016. – №. 3. – С. 79-90.

132. Lee, H-S. Crystallization of Borosilicate Glasses for High-Strength Bulletproof Materials / H-S. Lee, G-I. Shim, S-Y. Choi // *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*. – 2013. – Vol. 16, № 3. – P. 358-364.

133. Yablon, A.D. Optical and mechanical effects of frozen-in stresses and strains in optical fibers // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2004. – Vol. 10. – P. 300-311.

134. Конструкционные пластмассы: Свойства и применение: Пер. с чеш. / И. Хуго, И. Кабелка, И. Кожени и др. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.

135. Ghanbarzadeh-Dagheyany, A. A holistic survey on mechatronic Systems in Micro/Nano scale with challenges and applications. / A. Ghanbarzadeh-Dagheyany, N. Jalili, M.T. Ahmadian // J Micro-Bio Robot. – 2021. – Vol. 17. – P. 1-22.

136. Семенов, Н.В. Остаточные напряжения в элементах анизотропного оптического волокна «Панда» с учетом технологических несовершенств геометрии: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04/ Семенов Никита Владимирович; – Пермь, 2015. – 108 с.

137. Kashaykin, P.F. Temperature and polarization dependence of radiation-induced attenuation in pure-silica-core PANDA optical fiber / P.F. Kashaykin; E.A. Pospelova, Yu.O. Sharonova; O.L. Vokhmyanina, I.S. Azanova, A.L. Tomashuk // Optical Materials. – 2022. – Vol. 131. – Art. 112510.

138. Ramadan, W.A. Two-dimensional refractive index and birefringence profiles of a graded index bent optical fibre / W.A. Ramadan, H.H. Wahba, M.A. Shams El-Din /. Optical Fiber Technology. – 2017. – Vol. 36. – P. 115-124.

139. Котов, О.И. Интерференционный метод измерения коэффициента экстинкции двулучепреломляющих волоконных световодов / О.И. Котов, Л.Б. Лиокумович, А.В. Медведев // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, №. 9. – С. 102-107.

140. Хлыбов, А.В. Волоконно-оптические поляриметрические датчики физических величин: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Хлыбов Артём Владимирович; – Санкт-Петербург, 2004. – 215 с.

Приложение А

Публичное акционерное общество
**«Пермская научно-производственная
 приборостроительная компания»**
 Россия, 614007, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
 Тел.: +7 (342) 240 05 28; факс: +7 (342) 280 97 19
 Приемная: +7 (342) 240 05 02
 Справочная: +7 (342) 240 05 12
 ИНН 5904000395, КПП 590401001
 E-mail: root@pnppk.ru
 www.pnppk.ru



Public Joint Stock
**«Perm Scientific-Industrial
 Instrument Making Company»**
 Russia, 614007, Perm, 25th October St., 106
 Phone: +7 (342) 240 05 02, Fax: +7 (342) 280 97 19
 E-mail: root@pnppk.ru www.pnppk.ru



№ 66/86-113-а от 08.11.2022 г.



УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 ПАО «ПНППК»
 А.Г. Андреев
 « 11 » 2022 г.

внедрения (использования) результатов диссертационной работы
 Лесниковой Юлии Игоревны

«Математическое моделирование термовязкоупругого поведения оптических волокон типа Panda и его конструктивных элементов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Настоящий акт свидетельствует о том, что научно-технические результаты, представленные в диссертационной работе Лесниковой Юлии Игоревны, посвященной математическому моделированию технологических процессов изготовления анизотропных оптических волокон, внедрены и используются в ПАО «ПНППК» при разработке и производстве анизотропного оптического волокна типа «Панда». Эти результаты были получены в рамках хозяйственного договора №2015/305 от 01.08.15 «Создание математической модели напряженного состояния волокна при силовых воздействиях и при действии температуры», в рамках грантов РФФИ №16-48-590660 «Контактные задачи термовязкоупругости в технологической механике кварцевых анизотропных оптических волокон» и № 20-48-596009 «Термомеханика защитных, защитно-упрочняющих покрытий и прослоек из современных полимерных и композиционных материалов». По итогам исследований к использованию в ПАО «ПНППК» приняты:

1. Методика выбора и определения критерия прочности силового стержня на основе анализа количественных значений критериальных характеристик, полученных в результате серии натуральных экспериментов на разрушение и их числительного моделирования.
2. Результаты исследований закономерностей формирования технологических напряжений в рамках технологической пробы и их влияние на оптические характеристики анизотропного оптического волокна типа «Панда».

Зам. генерального директора по науке –
 директор НТЦ – главный конструктор

А.В. Субботин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2022669739

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2022669739Дата регистрации: **25.10.2022**

Номер и дата поступления заявки:

2022669657 25.10.2022Дата публикации: 25.10.2022

Контактные реквизиты:

patinf@pstu.ru

Авторы:

**Лесникова Юлия Игоревна (RU),
Труфанов Александр Николаевич (RU),
Сметанников Олег Юрьевич (RU),
Каменских Анна Александровна (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)**

Название программы для ЭВМ:

**Трехточечный изгиб заготовок силовых стержней анизотропных оптических волокон
типа Panda**

Реферат:

Программа предназначена для моделирования термомеханического поведения конструктивных элементов заготовок для вытяжки оптического волокна типа Panda в условиях технологических процессов их изготовления и эксперимент на трехточечный изгиб с учетом остаточных технологических напряжений. Функционал программы нацелен на анализ конструкционной прочности заготовок оптического волокна. Программа предназначена технологом для анализа и корректировки технологии изготовления и конструкции изделий.

Язык программирования: ADPL**Объем программы для ЭВМ: 0.28 Мб**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2022669757

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

| | |
|--|---|
| Номер регистрации (свидетельства): 2022669757 Дата регистрации: 25.10.2022 Номер и дата поступления заявки: 2022669685 25.10.2022 Дата публикации: 25.10.2022 Контактные реквизиты: patinf@pstu.ru | Авторы: Лесникова Юлия Игоревна (RU), Труфанов Александр Николаевич (RU), Сметанников Олег Юрьевич (RU), Каменских Анна Александровна (RU) Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) (RU) |
|--|---|

Название программы для ЭВМ:

Программа испытания анизотропного волокна типа Panda с учетом изгиба и натяга в широком диапазоне температур от -60 до +60 °С

Реферат:

Программа предназначена для моделирования термомеханического поведения анизотропного оптического волокна типа Panda с учетом двухслойного полимерного защитно-упрочняющего покрытия, остаточных технологических напряжений, релаксационных переходов в объемах полимерных материалов, изгиба, натяга и контакта с алюминиевой катушкой в широком диапазоне температур от -60 до +60 °С. Функционал программы нацелен на анализ эволюции деформационных и оптических характеристик волокна в рамках термоцикла, в том числе при отклонении геометрических параметров конструктивных элементов. Программа предназначена для помощи технологам, аналитикам и инженерам при анализе влияния сложного напряженно-деформированного состояния оптического волокна типа Panda с защитно-упрочняющим полимерным покрытием на деформационные и оптические характеристики конструкции в широком диапазоне рабочих температур.

Язык программирования: ADPL

Объем программы для ЭВМ: 0.52 Мб