

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)

ПОЛУЧЕНО
ИПРИМ РАН

17.09.2024г.
вн. №148
ИУ



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Труфанова Александра Николаевича
на тему «Термомеханические процессы в специальных оптических
волокнах при их производстве и эксплуатации», представленную к защите
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Александра Николаевича Труфанова посвящена исследованию термомеханических процессов, которые происходят в сохраняющих поляризацию специальных оптических волокнах, на различных этапах их производства и эксплуатации.

Рассматриваемые в работе специальные оптические волокна широко используются в качестве чувствительного элемента в современных сенсорных системах для измерения различных физических величин: перемещений, давления, температуры, скорости потока, напряженности электрического и магнитного полей и многого другого, при этом датчики на их основе могут быть как дискретными, так и распределенными по всей длине волокна. Важным приложением таких волокон являются навигационные решения на основе оптоволоконных гироскопов, которые от традиционных инерционных отличаются меньшими габаритно-весовыми характеристиками, быстрым временем старта и сопоставимой точностью измерений. Другим актуальным направлением использования таких оптических волокон является мониторинг сложных инженерных объектов и конструкций, в которые встраивают подобные распределенные волоконно-оптические сенсорные системы, что позволяет контролировать необходимые параметры в режиме реального времени.

Оптоволоконные системы позволяют достигать высочайшей точности измерения, однако при этом световоды также чувствительны к другим термосиловым факторам, обусловленным внешними термосиловыми факторами, в том числе термомеханическими процессами, протекающими в полимерных покрытиях. Понимание протекающих физических процессов, происходящих при данных условиях в волокне, позволяют учитывать их и точнее интерпретировать регистрируемые данные, повышая тем самым точность измерительных приборов.

Процесс производства специальных оптических волокон достаточно сложен и состоит из нескольких технологических этапов, на которых заготовки конструктивных элементов из легированных кварцевых стекол разогреваются до температур выше температуры стеклования и далее охлаждаются, в процессе чего из-за неоднородности конструкции и достаточно сложного профиля легирующих в таких изделиях формируются поля остаточных напряжений. Напряженно-деформированное состояние в силу известных фотоупругих эффектов влияет на оптические характеристики кварцевого стекла и изготовленного из него оптического волокна. Задача инженеров и технологов, с одной стороны, заключается в том, чтобы так подобрать конструкцию волокна и выстроить технологический процесс, чтобы в готовом изделии формирующиеся поля остаточных напряжений, обеспечивали как можно большую разность главных напряжений в светопроводящей жиле волокна, что позволяет получить наилучших условия, для сохранения поляризации введенного светового сигнала. С другой стороны, важно обеспечить необходимую прочность всех конструктивных элементов и самого изделия в процессе их производства и дальнейшей эксплуатации. Реализующийся в изделиях на разных этапах в процессе производства высокий уровень напряженного состояния зачастую приводит к их разрушению.

Исходя из таких предпосылок соискателем определена цель диссертации – установление закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в стеклюющихся материалах при производстве и эксплуатации анизотропных оптических волокон, для развития подходов к проектированию новых и рационализации существующих оптоволоконных изделий. Для достижения данной цели автором работы грамотно определены конкретные задачи, выбраны подходы и методы для их решения. Методами механики деформируемого твердого тела выполнено комплексное исследование технологического процесса производства анизотропного оптического волокна типа «Панда». Соискателем в рамках представленного диссертационного исследования широко используется математический аппарат, методы натурального и вычислительного экспериментов. Все главы и подразделы диссертации логически связаны между собой единой смысловой линией исследования, что обеспечивает четкую структуру и внутреннее единство работы.

В представленном к защите диссертационном исследовании автор рассматривает проблему построения моделей термомеханического поведения кварцевых стекол, учитывающую два основных фактора возникновения технологических и остаточных напряжений в изделиях из стеклюющихся материалов. Во-первых, несовместность температурных деформаций из-за различия коэффициентов температурного расширения вследствие неоднородности материалов. Во-вторых, реализацию в изделиях при охлаждении пространственно-временной неоднородности температурных полей и достаточно сложной картины протекания процесса стеклования, что ведет к формированию в разных точках сечения различной истории деформирования. Также предложена математическая модель термомеханического поведения полимеров, используемых при производстве специальных оптических волокон в качестве защитных покрытий. Предложенные определяющие соотношения позволяют адекватно описывать влияние защитно-упрочняющих покрытий на

технологические и остаточные напряжения в оптических волокнах в широком температурном диапазоне, включающем релаксационные переходы. Для идентификации предложенной модели разработаны методики определения и верификации материальных констант. На основании построенных моделей выполнен достаточно большой объем вычислительных экспериментов, получены данные, позволившие оценить эволюцию полей напряжений в изделиях в процессе их производства и эксплуатации. Полученные результаты верифицированы на основании серии натуральных экспериментов, с которыми численные модели хорошо согласуются. В итоге, предложенные подходы и методики, а также полученные экспериментальные данные позволили улучшить технологические процессы производства, снизить процент брака и улучшить эксплуатационные характеристики готовых изделий.

Актуальность исследования.

Тема диссертационного исследования и, в частности, проблема создания моделей термомеханического поведения изделий стеклюющихся материалов, которая позволяла бы учитывать основные факторы формирования остаточных и эволюцию технологических напряжений в специальных оптических волокнах, является актуальной и востребованной, в первую очередь, из-за широкого распространения в современных отраслях промышленности различных волоконно-оптических приложений, смарт материалов, сенсорных и мониторинговых систем. Создание выверенного математического аппарата, позволяющего моделировать не только технологические процессы изготовления подобных изделий, но и прогнозировать их поведение в эксплуатационных режимах дает мощный прогностический инструмент для исследователя, технолога, инженера или проектировщика. Позволяя рационализировать технологию производства специальных оптических волокон различной геометрии и конструкции, оптимизировать отдельные этапы изготовления и геометрию конструктивных элементов, создавать новые варианты конструкций специальных оптических волокон, сохраняющих поляризацию. Кроме того, такие математические модели позволяют более точно интерпретировать результаты, получаемые с датчиков на основе специальных оптических волокон.

Автором справедливо указывается на необходимость учета влияния полимерного защитного покрытия на напряженно-деформированное состояние, реализующееся в специальных оптических волокнах, и следовательно, и на его оптические характеристики. Учитывая, что в таких полимерах в диапазоне эксплуатационных температур происходят релаксационные переходы такое влияние может проявляться во времени, зависеть от скорости изменения температур, скорости деформаций, частотных параметров силовых воздействий и многих других параметров, что в свою очередь также может оказывать влияние на оптические параметры оптических волокон и изделий на их основе. Следует отметить справедливость утверждения соискателя, что применяемые в настоящее время для прогнозирования напряженно-деформированного состояния термоупругие модели не в состоянии учитывать сложное термомеханическое поведение реономных материалов, используемых в специальных оптических волокнах. Это достаточно сильно ограничивает применимость подобных постановок для решения актуальных задач технологической механики оптических волокон.

Предложенные в работе подходы и методики позволяют на основании вычислительных экспериментов прогнозировать оптические характеристики специальных оптических волокон, а полученные данные о напряженно-деформированном состоянии дают возможность рационально управлять технологическим процессом производства, получая необходимые эксплуатационные параметры и снижая риски разрушения заготовок.

Таким образом, предложенные автором диссертационного исследования подходы и полученные в рамках работы научные результаты и методики позволяют строить более сложные модели волоконно-оптических датчиков могут быть использованы для научно обоснованного проектирования оптоволоконных изделий и, прежде всего, современных навигационных систем, а также крайне востребованы в задачах, решение которых продиктовано необходимостью замещения отдельных этапов технологического процесса производства решениями, основанными на отечественных продуктах, что безусловно вносит значительный вклад в обеспечение технологического суверенитета страны и является важным направлением научно-технологического развития для народного хозяйства РФ.

Структура и объем диссертации.

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

Во введении автором описывается предмет исследования, обосновывается актуальность выбранной темы, приведены основные научные наработки в этой сфере, доступные в открытых источниках. Также сформулирована цель исследования и задачи, решение которых необходимы для ее достижения, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, описана апробация результатов, дана информация о структуре работы.

В первой главе изложена общая информация о специальных оптических волокнах, описаны основные этапы изготовления анизотропного волокна типа «Панда» и ряда других типов световодов, сохраняющих поляризацию. Автором выделены основные задачи технологической механики специальных волокон «Панда», соответствующие наиболее важным этапам технологического процесса его производства.

Во второй главе рассмотрены особенности термомеханического отклика стеклюющихся материалов, используемых при производстве оптических волокон. Выполнен литературный обзор моделей, описывающих термомеханическое поведение стеклюющихся материалов и обобщена известная информация по физико-механическим свойствам легированных кварцевых стекол.

По полученным данным **в третьей главе** построены функциональные зависимости термомеханических и теплофизических свойств от температуры и концентрации используемых легирующих добавок.

В четвертой главе изложены основные сведения о полимерных защитно-упрочняющих покрытиях специальных оптических волокон. на основании натуральных экспериментов показано, что в рассматриваемых материалах в эксплуатационный диапазон температур попадают релаксационные переходы.

На основании данных производителя, литературных источников и натуральных испытаний, получены данные о термомеханических свойствах защитно-упрочняющих покрытий. Установлено, что в некоторых из рассматриваемых полимерах наблюдаются эффекты физического старения, которые также могут влиять на напряженно-деформированное состояние, реализующееся в оптических волокнах и на точность датчиков на их основе. Автором описана новая методика измерения коэффициента термического расширения пленочных образцов на основании натуральных испытаний на ДМА. Для ряда полимеров получены функциональные зависимости КЛТР от температуры. Показано, что деформационный отклик полимеров зависит не только от температуры, но и от скорости её изменения. На основании анализа полученных экспериментальных данных автором выдвинута гипотеза о возможности накопления остаточной деформации в полимерах в условиях термоциклирования, которая далее была подтверждена экспериментально.

В п.4.3 представлена процедура идентификации материальных констант определяющих соотношений для полимерных пленок защитного покрытия на базе натуральных испытаний на ДМА. Для аналитического описания использована линейная вязкоупругая модель с ядром релаксации в виде суммы экспонент. Полученные физические соотношения верифицированы по результатам серии натуральных экспериментов на ползучесть.

В пятой главе представлен литературный обзор моделей формирования остаточных напряжений в оптических волокнах. В общем виде выполнена математическая постановка и описан алгоритм ее численной реализации. Рассмотрены модельные задачи, на которых показаны возможности модели описывать основные механизмы формирования, эволюции и релаксации остаточных напряжений в изделиях из легированных кварцевых стекол.

В шестой главе рассмотрены задачи технологической механики, соответствующие ключевым этапам производства силовых элементов для волокна типа «Панда». Методами численного анализа исследованы закономерности эволюции напряжений в силовых стержнях с разной геометрией и профилем легирования, получены данные о влиянии отжига и травления. По результатам измерения более 100 силовых стержней получены данные о распределениях геометрических параметров заготовок и на основании полученных данных численно смоделированы и проанализированы возможные варианты реализующихся в них полей остаточных напряжений. Также установлено, что легированная зона силовых стержней как правило имеет форму некругового цилиндра с тремя криволинейными гранями. Методами натурального и вычислительного экспериментов установлены количественные данные, характеризующие конструкционную прочность силовых стержней. Решена задача определения оптимального профиля легирования. Методами натурального эксперимента установлена частичная кристаллизация стекла на границе зоны легирования и определено его влияние на прочность конструкции.

В седьмой главе рассмотрены задачи технологической механики, соответствующие ключевым этапам производства волокна типа «Панда». Описана методика прогнозирования оптических характеристик на основе полученных полей остаточных напряжений. Методами численного моделирования установлена рациональная геометрия конструкции. На

основании обработки 1400 микрофотографий поперечного сечения волокна типа «Панда» установлены распределения отклонений геометрии реальных изделий от проектных значений. Установлено влияние этих отклонений на НДС и оптические характеристики световодов. Для ряда оптических волокон выполнено сравнение измеренных и численно рассчитанных значений двулучепреломления, полученные результаты удовлетворительно согласуются, что подтверждает адекватность предложенных моделей и подходов. Представлены результаты численного моделирования технологической пробы, исследованы основные механизмы влияния на НДС оптического волокна в условиях термоцикла, контактного взаимодействия с алюминиевой катушкой. Продемонстрировано влияние термомеханических процессов в защитно-упрочняющем покрытии на оптические характеристики волокна.

В заключении приведены основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования.

Основные результаты и новизна.

Автором диссертационной работы методами механики деформируемого твердого тела выполнено комплексное исследование технологического процесса производства специального оптического волокна типа «Панда». Предложены и описаны новые методики и модели, позволившие построить математические модели, на основании которых получены данные о закономерностях эволюции технологических напряжений в изделиях из неоднородно легированных кварцевых стекол и полимеров в нестационарных температурных полях с учетом происходящих в материалах релаксационных переходов. Построенные модели использованы для исследования эволюции технологических и остаточных напряжений, возникающих в конструктивных элементах анизотропного оптического волокна в процессе его производства и эксплуатации. На основании полученных результатов были даны рекомендации для рационализации технологии производства оптоволокон типа «Панда», что позволило снизить брак и улучшить эксплуатационные характеристики изделий. Предложенные автором подходы, методы и алгоритмы могут быть использованы для моделирования волоконно-оптических датчиков, для научно обоснованного проектирования современных оптоволоконных сенсорных и навигационных систем, разработка и производство которых необходимы для обеспечения технологического суверенитета РФ.

В рамках диссертационной работы создано проблемно-ориентированное прикладное ПО, для прогнозирования напряженно-деформированного состояния изделий из стеклующихся материалов.

Автором впервые установлен факт зависимости КЛТР полимеров от температуры и от скорости ее изменения. Показано, что при термоциклировании в них могут формироваться остаточные деформации, обусловленные различием деформационного отклика при нагреве и охлаждении. Предложена новая методика натурных испытаний для определения функциональной зависимости КЛТР пленочных образцов от температуры, а для ряда полимеров впервые получены подобные данные.

Построены новые математические модели формирования и эволюции технологических напряжений в специальном оптическом волокне типа «Панда» при его производстве с учетом релаксационных переходов в неоднородно

легированных стеклах и полимерах защитного покрытия. Ключевым элементом упомянутых моделей стали определяющие соотношения линейной теории вязкоупругости, для кварцевых стекол и полимеров ЗУП, работающие в широком диапазоне температур, включающем релаксационные переходы. Предложенные определяющие соотношений верифицированы по данным натуральных экспериментов.

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

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

По результатам измерения представительной партии изделий установлена реальная геометрия волокна и его конструктивных элементов. Определены статистические закономерности и диапазоны отклонений геометрии изделий от проектных значений. Полученные данные использованы в многопараметрических вычислительных экспериментах, позволивших установить основные закономерности эволюции НДС и оптических характеристик волокна с учетом характерных отклонений геометрии. Показано значительное влияние наблюдаемых отклонений геометрии сечения на его оптические характеристики, в частности на двулучепреломление волокна (до 30%).

Методами численного анализа установлены основные закономерности эволюции оптических характеристик волокна с учетом термомеханических процессов, происходящих в защитном полимерном покрытии в условиях термосилового воздействия.

Представленные подходы, модели и методики могут быть использованы для проектирования широкого спектра вариантов конструкций специальных оптических волокон, сохраняющих поляризацию.

Следует отметить, что описанные результаты диссертационной работы обладают признаками новизны, представляют теоретическую и практическую значимость.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Практическая ценность представленных соискателем результатов подкреплена значительным количеством хоздоговорных научно-исследовательских работ по тематике диссертационной работы и представленным актом внедрения результатов работы на производстве, а её теоретическая значимость подтверждается достаточно широким списком выполненных фундаментальных исследований в рамках проектов, поддержанных РФФИ.

Полученные на основании построенных моделей данные позволили обеспечить рационализацию технологических процессов и сокращение брака при производстве специального оптического волокна, что однозначно

подчеркивает практическую важность результатов диссертационного исследования.

Следует также отметить теоретическую значимость экспериментальных исследований деформационного отклика полимерных пленок на изменение температуры и зависимость этих процессов от скорости её изменения. Полученные автором данные дополняют известные представления о механизмах формирования остаточных и технологических напряжений.

Достоверность

Достоверность представленных соискателем результатов обеспечивается использованием стандартных методик измерения, а разработанные автором новые методики измерений верифицированы по результатам экспериментов на образцах с известными характеристиками. Достоверность математических моделей обеспечивается корректностью постановок, а полученные на их основе данные вычислительных экспериментов подтверждаются результатами натуральных испытаний, и соответствуют результатам, опубликованным другими авторами в литературных источниках.

Апробация работы

Соискателем по результатам представленной работы опубликовано более 60 печатных работ, в том числе 19 из перечня, установленного Минобрнауки России для представления результатов докторских диссертаций, из них 11 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus. Автором также получено 2 свидетельства о государственной регистрации ПО для ЭВМ на программные продукты, разработанные в рамках выполненных исследований. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и на научных конференциях различного уровня.

Таким образом, представленная соискателем работа в достаточной мере апробирована, качество и количество публикаций соответствует п.11 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (в редакции от 25.01.2024 г.).

Вопросы и замечания по диссертации:

1. В подразделе 6.5 приводится решение задачи оптимизации, в результате которого автором получена зависимость, описывающая оптимальное распределение легирующей добавки для силового стержня специального волокна типа «Панда» (рисунок 6.75). Возможна ли в рамках существующих технологических процессов практическая реализация такого распределения или оно несет только теоретическую оценку?
2. В рамках экспериментального исследования деформационного отклика пленок фотополимеров автором установлена зависимость КЛТР от температуры и скорости ее изменения. Проявляется ли подобное поведение у других полимеров и могут ли наблюдаемые эффекты играть значимую роль в прикладных задачах механики деформируемого твердого тела?
3. Полимеры защитно-упрочняющего покрытия исследуемого оптического волокна значительно более податливы, чем кварцевые стекла, используемые для производства оптического волокна. Насколько значимо влияние релаксационных процессов и связанных с ними

термомеханических эффектов на напряженно-деформированное состояние в светопроводящей жиле, насколько значимы они на практике и отражаются ли они на оптических параметрах и на показаниях датчиков на основе таких специальных волокон?

4. В оформлении диссертации и автореферата есть некоторые недочеты. Так на стр. 47 в подписи к рисунку 3.4 написано « $B_2O_3-SiO_2$ », должно быть « $B_2O_3-SiO_2$ », в автореферате на рисунках встречаются греческие буквы в курсивном начертании (стр. 22, 23, 27), в оформлении ряда рисунков используются обозначения на английском (рисунок 4.1-4.3 диссертации, рисунок 6, 7, 17 автореферата).

Указанные замечания не умаляют значимости диссертации и ни в коей мере не снижают высокую положительную оценку исследования, основные выводы и результаты которого обоснованы, имеют теоретическую и практическую ценность.

Заключение по диссертации.

В рамках представленного соискателем исследования, проделана достаточно масштабная работа, выполнен значительный объем натурных и вычислительных экспериментов, а полученные результаты обладают признаками новизны, полезны для практических приложений, имеют ценность для теории механики деформируемого твердого тела дополняя ее новыми фактами и данными.

Диссертационную работу можно охарактеризовать как комплексное системное исследование, посвященное изучению термомеханических процессов в специальных оптических волокнах и, в том числе, решению широкого круга задач технологической механики, связанных с моделированием процесса производства и эксплуатации подобных изделий. Предложенные методики прогнозирования напряженно деформированного состояния в оптоволоконных изделиях дают возможность используя научно обоснованные подходы к проектированию создавать новые варианты конструкции специальных оптических волокон и современных измерительных систем на их основе, совершенствовать и рационализировать технологические процессы производства, снижать брак и улучшать эксплуатационные параметры таких изделий.

Полученные в рамках выполнения работы результаты, предложенные подходы и методики, обеспечивают значимый вклад в решение задач замещения отдельных этапов технологических цепочек на отечественные решения и обеспечения развития научного задела по стратегическим направлениям научно-технологического развития, имеют практическую и теоретическую ценность для народного хозяйства РФ.

Таким образом, диссертационная работа А.Н. Труфанова представляется актуальной и востребованной, вносит значимый вклад в решение задач создания современных отечественных навигационных систем и обеспечения технологического суверенитета России. Это подтверждается использованием полученных результатов для совершенствования технологии производства оптоволоконных гироскопов, позволило сократить брак и улучшить эксплуатационные характеристики изделий.

Тексты представленной соискателем диссертационной работы и автореферата оформлены в соответствии с принятыми в научной литературе стандартами, изложение материала ясное, четкое, логически последовательное. Внутреннее единство диссертации прослеживается в структуре работы, чёткой последовательности и связности отдельных её этапов, в единой логической линии постановки задач, натуральных и вычислительных экспериментов.

Оформление диссертации и автореферата выполнено в соответствии с ГОСТом и требованиями ВАК, предъявляемыми к данному виду работ. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации и ее вклад в развитие темы.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаем, что диссертационная работа Труфанова Александра Николаевича «Термомеханические процессы в специальных оптических волокнах при их производстве и эксплуатации» выполнена на высоком научном и методическом уровнях, является завершённым целостным научным исследованием, соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, отрасли – технические науки, а также удовлетворяет всем квалификационным требованиям ВАК РФ, установленным пп.9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к докторским диссертациям, а автор работы – Труфанов Александр Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация и автореферат Труфанова Александра Николаевича рассмотрены, а отзыв обсужден и одобрен на совместном научном семинаре лаборатории мехатроники и лаборатории прикладных исследований Института проблем машиноведения Российской академии наук 10 сентября 2024 г., протокол заседания № 7/2024.

Член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук (1.1.8),
главный научный сотрудник ИПМаш РАН

Александр
Константинович
Беляев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)
199178, Санкт-Петербург, Большой пр., ВО, д. 61
Тел. +7 (812) 321-47-78; E-mail: ipmash@ipme.ru

