

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию Труфанова Александра  
Николаевича**

**«Термомеханические процессы в специальных оптических волокнах при  
их производстве и эксплуатации», по специальности 1.1.8. Механика  
деформируемого твердого тела, представленную на соискание ученой  
степени доктора технических наук, выполненную в ФГАОУ ВО  
«Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»**

Диссертация Труфанова Александра Николаевича посвящена исследованию закономерностей формирования остаточных и технологических напряжений в специальных оптических волокнах, которые получили широкое применение в качестве чувствительных элементов в датчиках различных физических параметров. Такие волокна изготавливаются методом высокотемпературной вытяжки из преформ состоящих из кварцевых стекол, с неоднородной по поперечному сечению концентрацией легирующих добавок. Реализующиеся достаточно сложные профили легирования необходимы для того, чтобы сформировать светопроводящую жилу и обеспечить в ней заданный уровень и конфигурацию полей остаточных напряжений.

Спектр изготавливаемых оптоволоконных сенсоров на основе специальных световодов крайне широк – это гироскопы, датчики перемещений, температуры, давления, потока, вибраций, ускорения и др. Распределенные оптоволоконные датчики на основе таких световодов зачастую используют в качестве систем мониторинга инженерных конструкций, внедряют в композитные материалы, что делает работу востребованной и **актуальной**.

Задачи, которые ставит перед собой автор в данной работе являются междисциплинарными и требуют знаний механики деформируемого твердого тела в сочетании с пониманием химических процессов и отчасти с оптикой.

По-видимому, этот фактор делает данную тему мало изученной и работ с учетом столь широкого спектра эффектов довольно мало, что говорит о **новизне** полученных результатов.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов диссертационного исследования состоит в развитии подходов и методов исследования термомеханического поведения, оптоволоконных изделий на различных этапах производства и эксплуатации. Полученные данные и выводы позволяют представить обоснованные рекомендации по совершенствованию технологических процессов, а также значительно расширяют существующие представления о физических процессах, происходящих в специальных оптических волокнах и их конструктивных элементах в условиях их производства и эксплуатации.

Содержание диссертации изложено во введении, семи главах, заключении, приложении и списке использованной литературы (377 источников). Общий объем диссертационной работы составляет 377 страниц.

**Во введении** приводится достаточно полный обзор литературы по исследуемой теме, последовательно обосновывается **актуальность и научная новизна** предлагаемых методик и постановок задач.

**Достоверность** результатов диссертационной работы обеспечена выбором хорошо апробированных численных методов (метод конечных элементов), а также классических методов механики сплошных сред, применимость которых к данному типу задач хорошо исследована и подтверждена. Проведены экспериментальные исследования на сертифицированном оборудовании.

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на большом количестве научных семинаров, международных и региональных конференциях.

Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 66 публикациях. Из них: 18 статей опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень, установленный Минобрнауки России для представления

результатов докторских диссертаций, из них 11 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus.

**В первой главе** автором описаны основные сведения о специальных оптических волокнах, сохраняющих поляризацию введенного в них сигнала, рассмотрены основные этапы процесса изготовления оптических волокон методом модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD).

**Во второй главе** приведен литературный обзор моделей термомеханического поведения стеклющихся материалов, описаны ключевые особенности рассмотренных моделей, отмечены аспекты, которые могут вызывать трудности при идентификации моделей или не позволяющие с достаточной точностью описывать наблюдаемые на практике эффекты. Материал обзора позволяет подобрать под задачу ту или иную модель, спланировать и обосновать экспериментальные исследования.

Представленный в разделе обзор источников охватывает значительное количество работ, содержащих экспериментальные данные, и может быть полезен в других задачах, в которых необходимы физико-механические свойства стекол с учетом их состава.

**В третьей главе** выполнено обобщение известных экспериментальных данных по свойствам рассматриваемых в работе стекол. Определены аналитические зависимости физико-механических свойств кварцевых стекол от температуры и концентраций легирующих добавок для наиболее распространенных в волоконной оптике составов.

**В четвертой главе** соискателем представлены основные данные о защитно-упрочняющих покрытиях специальных оптических волокон. Для идентификации моделей выполнена постановка экспериментов и проведены натурные испытания пленочных образцов. Для определения КЛТР предложена новая методика, а представленный обширный материал экспериментальных исследований, позволил установить также зависимость КЛТР полимеров не только от температуры, но и от скорости ее изменения.

Этот эффект в условиях термоцикла может приводить к накоплению остаточной деформации, в подтверждение чему приведены результаты соответствующего эксперимента.

**В пятой главе** соискателем представлен анализ представленных в литературных источниках математических моделей формирования остаточных напряжений в оптических волокнах с целью прогнозирования на их основе оптических характеристик. Описана математическая постановка краевых задач для моделирования технологических задач производства специальных оптических волокон и приведен алгоритм их численной реализации. На модельных задачах показано, что предложенная модель качественно верно описывает основные механизмы формирования, эволюции и релаксации остаточных напряжений в легированных кварцевых стеклах

**В шестой главе** выполнена постановка и решена задача определения оптимального профиля легирования. Автор отмечает, что предложенная методика поиска оптимального варианта легирования, может быть использована для проектирования силовых стержней с разными целевыми характеристиками, например, для обеспечения длительной сохранности высоколегированных изделий необходимо учитывать данные о долговременной прочности.

**В главе семь** рассматриваются дефекты и несовершенства оптических волокон. Установлено влияние несовершенств геометрии на НДС и оптические характеристики волокна. Выполнено сравнение измеренных на натуральных образцах значений двулучепреломления с результатами численного моделирования с учетом реальной геометрии волокна и технологии его изготовления. Полученные результаты расчета удовлетворительно согласуются.

**В заключении** приведены основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования.

В целом, можно отметить, что работа написана грамотным научным языком, материал изложен последовательно, логично, подробно и четко. В

заключении автор делает выводы, соответствующие цели и задачам диссертационного исследования. Предложенные практические рекомендации обоснованы и вытекают из полученных результатов. Представленные в начале работы списки сокращений и основных обозначений делают восприятие текста проще, а поиск введенных обозначений более удобным.

К работе есть следующие **замечания**:

1. На странице 11 автор пишет, что практически во всех работах свойства материалов рассматриваются как независимые от температур, хорошо бы было указать работы где это не так, это сэкономило бы время следующим исследователям.
2. Одной из слабых сторон работы является отсутствие сравнения используемой модели отверждения с экспериментами. Автор довольно холодно отзывается о работе Болотина, где используется гипоупругая модель. При этом на основе такой модели различными авторами получено существенное количество результатов сверенными с экспериментами для довольно разных полимеров.
3. На странице 42 автор утверждает, что для стекла  $\text{SiO}_2$  - $\text{B}_2\text{O}_3$  модуль растёт на 9-11% с ростом температуры, что является крайне необычным.
4. Есть замечания к оформлению. На некоторых рисунках, например, рисунок 4.1, подписи сделаны на английском языке. На стр. 92 присутствует опечатка в слове “свидетельствует”. Рис. 7.4-7.7 нет единиц измерения.
5. На стр. 85 автор рассуждает о том, что температурные деформации зависят не только от изменения величины температуры, но и от скорости ее изменения, при этом нет убедительных доказательств, что это не вызвано протеканием какой-либо реакции. При этом рис. 4.16 показывает небольшое выделение тепла при изменении температуры, что говорит в пользу протекания некоторой реакции в материале.

6. В работе в каждой главе приводится некоторое введение, что привело к довольно большому повтору с первоначальным введением, например, стр. 37 и стр. 120.
7. На 147 странице в формуле 5.4.1 используются напряжения с индексом  $x$  и  $y$ . В пояснении написано, что это нормальные напряжения к поперечному сечению волокна. Не понятно каким образом может быть два нормальных напряжения у одного сечения.
8. При решении задач отверждения используются гипотезы плоской деформации, где продольные деформации волокна равны нулю. Проблема в том, что при решении задач температурной или химической усадки данная гипотеза может быть не выполнена. Деформация вдоль волокна будет постоянной, но ненулевой если концы волокна не закреплены в продольном направлении.
9. Когда речь идет о частичной кристаллизации материала, не учитывается возможная усадка материала ей вызванная, а ведь это потенциальный источник дополнительных остаточных напряжений. Аналогичная ситуация с защитным покрытием выполненном из фотополимера, при его отверждении также будет усадка, которая никак не обсуждается в работе.

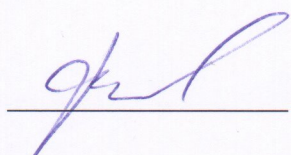
Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Предложены новые методики и на их основе проведены практически значимые исследования. Автореферат соответствует содержанию работы. Представленная соискателем диссертация является законченным комплексным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа содержит новые экспериментальные, вычислительные и теоретические результаты, объединенные единой смысловой линией, является завершенным научным исследованием на актуальную тему. Приведенные научные результаты вносят значительный вклад в развитие задач моделирования технологических

процессов, имеют существенное научное и практическое значение в области проектирования, производства и эксплуатации оптических волоконных световодов и изделий из них. Исследование подкреплено значительным объемом экспериментальных данных, полученных автором самостоятельно. Выводы и рекомендации, представленные автором обоснованы и корректны.

На основании вышесказанного можно утверждать, что диссертационная работа Александра Николаевича Труфанова на тему «Термомеханические процессы в специальных оптических волокнах при их производстве и эксплуатации» является завершенным комплексным исследованием, выполненным на высоком уровне. Работа соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор достоин присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории пластичности, ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова



Федулов Борис Никитович

Место работы: ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносов

Адрес места работы: 119991, г.Москва, Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7 9161316651

E-mail: [fedulov.b@mail.ru](mailto:fedulov.b@mail.ru)

Подпись официального оппонента Б.Н.  
Федулова заверяю  
декан механико-математического  
факультета член-корреспондент РАН,  
профессор

Андрей Игоревич Шафаревич

