

## ОТЗЫВ

официального оппонента Корсакова Александра Сергеевича на диссертационную работу Булатова Максима Игоревича «Прочность, трещиностойкость и оптические потери кварцевых волокон с защитными покрытиями», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «2.6.17 Материаловедение (технические науки)»

### Актуальность темы исследования

На данный момент времени, в мире увеличиваются потребности в специальном оптическом волокне, которое может эксплуатироваться при высоких температурах и давлениях. Это важно для таких сфер, как нефтегазовая и атомная промышленность в качестве распределительных датчиков температур. В таких условиях эксплуатации волокно должно с минимально возможной задержкой передавать оптический сигнал, причем срок службы этого оптического изделия должен быть максимальный. Представляет практический интерес применение специальных волокон в экстремальных условиях эксплуатации. Для этого необходимо анализировать механические и оптические свойства и строить прогноз поведения волокна в тех или иных условиях, при которых происходит реальная эксплуатация.

Из-за отсутствия подробных данных в литературных источниках о сроках службы и эксплуатации конкретного волокна с различными защитными покрытиями в различных атмосферах, диссертационная работа Булатова М.И. имеет важное значения для реального производства и людей, занимающихся в этой области.

В связи с этим, решение задач, поставленных в диссертационном исследовании Булатовым М.И., целью которого является определение механических и оптических характеристик волокон и прогноз срока службы в тяжелых условиях, весьма актуально и своевременно.

### Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включающего 14 таблиц, 61 рисунок, списка литературы из 150 наименований, 2 приложений.

В первой главе соискатель приводит обзор литературы по кварцевым волокнам, их основным свойствам и применениям. Большой акцент сделан на распространение трещин и механическим разрушением волокон с различными покрытиями. Сформулированы основные проблемы при экстремальных условиях эксплуатации оптических волокон.

Во второй главе описаны характеристики материалов и методы исследования.

Третья глава посвящена оптическим волокнам без покрытия и с полиимидным покрытием. Соискателем адаптирована методика Ниихары к кварцевым волокнам, найдена трещиностойкость кварца и выполнено ее сравнение со справочными результатами. Исследована структура кварца при больших увеличениях. Соискатель использовал статистику Вейбулла для представления прочностных результатов. Определил, что если покрытие удалить химическим путем, то прочность увеличивается в 3 раза, по сравнению с волокном без покрытия (при измерении после вытяжки), это связано с обратным эффектом Ребиндера. Кроме того, получено много данных по прочностным свойствам волокон с углерод/полиимидными и полиимидными покрытиями. Методом термогравиметрического анализа соискатель обнаружил испарение остаточного растворителя в покрытии, а также нашел энергию активации деструкции и спрогнозировал срок службы при конкретных температурах.

Четвертая глава посвящена оптическим волокнам с медным и алюминиевым покрытиями. Соискателем впервые найдена трещиностойкость волокон с металлическими покрытиями, которая превысила значение кварца в 3-4 раза, соискатель связывает это с сжимающими напряжениями. Исследованы волокна с различной толщиной кварца в металлических покрытиях и обнаружено, что вклад покрытия вносит в общую прочность около 40%, а прочность массивных образцов подчиняется масштабному фактору.

В пятой главе приведены результаты испытаний оптического волокна с медным покрытием в экстремальных условиях эксплуатации. Определены прочность, трещиностойкость и оптические потери в вакууме. Показано, что ухудшение этих характеристик связано с кристаллизацией кварца, это подтверждают данные дифференциальной сканирующей калориметрии, а также фотографии на сканирующем электронном микроскопе. Также, при испытании при 350 °С, оптические потери могут уменьшаться, из-за рекристаллизации медного покрытия, что доказано экспериментально соискателем. Проведены испытания при воздействии водорода, найдена энергия активации насыщения молекулярным водородом, а также оценено время насыщения при различных температурах.

В заключении сформулированы общие выводы по результатам исследования, даны рекомендации по их использованию. Содержание глав полностью соответствует выносимым на защиту положениям.

Следует отметить высокое качество аналитического обзора предшествующих публикаций, проведенных автором.

## Научная новизна

Соискателем впервые определена трещиностойкость кварцевых волокон с органическими и металлическими покрытиями методом Нииахары, применена модель разрушения, позволяющая вычислить параметр интенсивности напряжений кварцевых волокон с покрытиями.

Автором диссертации предложена гипотеза, что рост прочности и трещиностойкости оптических волокон с полиимидными покрытиями, обусловлен обратным эффектом Ребиндера (заполнение микротрещин материалом покрытия) и сжимающими напряжениями, возникающими при охлаждении волокон с металлическими покрытиями.

Соискателем впервые, установлено, что методом дифференциальной сканирующей калориметрии при скорости нагрева  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  у волокон с сердцевиной из чистого кварца и оболочкой легированной фтором, формируется кристаллическая структура в интервале температур  $630\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что приводит к существенному ухудшению оптических и механических свойств.

Считаю, что описанные выше научные результаты соискателя являются новыми и оригинальными.

## Практическая и теоретическая значимость результатов работы.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что нанесение металлических покрытий позволяет увеличить трещиностойкость  $K_{Ic}$  в 3-4 раза, по сравнению с волокнами без покрытий. Соискателем разработана новая технология термической обработки кварцевых оптических волокон с полиимидными и углерод/полиимидными покрытиями, которая позволяет улучшить их свойства и увеличить работоспособность.

Показано, что волокна с полиимидным покрытием могут эксплуатироваться при температурах до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а после термической обработки показывают уменьшение оптических потерь на  $1\text{ дБ}/\text{км}$  при  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оптические потери в волокнах с медными покрытиями до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  остаются стабильными и даже могут уменьшаться при температуре  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  из-за рекристаллизации медного покрытия, что подтверждается методом дифференциальной сканирующей калориметрии и металлографически. Оптические потери и механические параметры ухудшаются из-за кристаллизации кварца, начало которой приходится на температуру  $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Полученные результаты реализованы в виде практических рекомендаций, методик исследования и прогнозирования прочности и трещиностойкости специальных оптических волокон, что позволило повысить

выход годной продукции на 10% на реальном производстве. В подтверждении практической значимости диссертации к ней приложен акт внедрения.

Нельзя не отметить, что работа соискателя выполнена в рамках проектов РФФИ «Прогнозирование работоспособности и деградации волоконных световодов в экстремальных условиях эксплуатации» (ответственный исполнитель) и Правительства Российской Федерации №218, «Создание высокотехнологичного производства специальных оптических волокон, стойких к воздействию высоких и низких температур, водородосодержащих сред и ионизирующего излучения для систем телеметрии объектов нефтегазовой, аэрокосмической и атомной промышленности». Результаты исследований соискателя используются в учебном процессе при проведении лабораторных работ по курсам «Фотоника и оптоинформатика», «Квантовая и оптическая электроника: лабораторный практикум Ч. 2».

Достоверность научных результатов и обоснованность выводов подтверждается большим статистическим объемом наблюдений, соответствием современным методикам обработки экспериментальных данных, согласованностью представленных результатов с данными других исследователей.

Содержание диссертации полностью отражено в публикациях, представленных в конце автореферата. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

### Замечания

1. При подготовке шлифов волокон указано, что использовались алмазные суспензии зернистостью 9, 3 и 1 мкм, при этом наблюдались дефекты и трещины размером порядка 20 нм. Чем обусловлен выбор именно этих суспензий? Пробовали ли суспензии с меньшей зернистостью?

2. Каковы типичные радиусы изгиба волокон во время разрушения при использовании метода двухточечного изгиба?

3. На рис 3.12 и 3.14 размерность оси оптических потерь указана в дБ/м. Должно быть в дБ/км.

В тексте диссертации работы присутствуют немногочисленные грамматические и стилистические ошибки.

Отмеченные замечания не снижают значимости представленных автором результатов и общей положительной оценки работы Булатова Максима Игоревича.

## Заключение.


Считаю, что диссертационная работа Булатова Максима Игоревича «Прочность, трещиностойкость и оптические потери кварцевых волокон с защитными покрытиями», является завершённой исследовательской работой, содержащей новые, и при этом важные научно-технические знания о кварцевых волокнах со специальными покрытиями.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждения ученых степеней» и Критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней, утвержденным «Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ», утв. ректором ПНИПУ от 09 декабря 2021 г., а ее автор, Булатов Максим Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Я, Корсаков Александр Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Булатова Максима Игоревича, и их дальнейшую обработку.

### Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Технологии стекла»  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
Университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

 / А.С. Корсаков/

«21» ноября 2023 г.

620002, г. Екатеринбург, Мира, д.19, УрФУ  
E-mail: [a.s.korsakov@urfu.ru](mailto:a.s.korsakov@urfu.ru)  
Телефон: +7 (904) 389 15 37

Наименование научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 01.04.05- Оптика

ПОДПИСЬ  
ЗАВЕРЯЮ.



УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФ  
МОРОЗОВА В.А.

