

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом 9
Тел.: +7 (495) 408-42-54, факс: +7 (495) 408-68-69
info@mipt.ru

11.02.2025 № 5.06-05/1292
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе



Баган Виталий
Анатольевич

2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Кашибадзе Виталия Валерьевича**
«Полимерные композиты, наполненные модифицированным оксидом и
карбидом вольфрама, для радиационной защиты линейных ускорителей
электронов с энергией до 10 МэВ», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность темы исследования

Линейные ускорители электронов (ЛУЭ) используются во многих сферах деятельности человека и с ходом технологического прогресса их распространение только увеличивается. Но ионизирующее излучение, возникающее в процессе эксплуатации ЛУЭ, является важным негативным фактором, исключающим их повсеместное и безопасное использование. Для решения данной проблемы прибегают к экранированию радиационно-защитными материалами, современные образцы которых не обеспечивают требуемых параметров защиты в условиях ограниченного пространства.

Поэтому создание новых радиационно-защитных материалов весьма актуально и наиболее перспективным направлением для этого являются полимерные композиты. Материалы для радиационной защиты на основе полимеров имеют ряд недостатков, таких как, низкая совместимость с высокоплотными наполнителями, низкая теплопроводность и недостаточная

изученность улучшения их теплофизических свойств и упрочнения поверхностных слоёв.

В связи с вышеизложенным актуальным представляется исследование Кашибадзе В.В., направленное на разработку полимерных композитов, наполненных модифицированным оксидом и карбидом вольфрама, для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ, в ходе которого решаются описанные недостатки.

Работа выполнялась в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FZWN-2023-0004 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, что подтверждает её актуальность.

Структура и содержание работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержит 169 страниц машинописного текста, включающего 28 рисунков, 38 таблиц, список литературы из 201 наименования и 3 приложения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации и изучена её разработанность. Сформулирована цель и основные задачи исследования. Приведена научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, представлены основные методы исследований. Автором сформулированы положения, выносимые на защиту, которые в последующих главах раскрываются и обосновываются. Представлены данные по достоверности, внедрению и апробации результатов работы. Показан личный вклад автора и количество работ, в которых изложены основные положения работы.

В первой главе рассмотрены важнейшие теоретические данные необходимые для понимания принципов работы и эксплуатации ЛУЭ. Изучен тип ионизирующих излучений, которые возникают при эксплуатации ЛУЭ, и требования к радиационной защите. На основе аналитического обзора значительного объема отечественной и зарубежной литературы используемых радиационно-защитных материалов для ЛУЭ показано, что наиболее перспективными являются полимерные композиты, после чего изучена их

радиационная стойкость. Представлена методика расчета радиационной защиты линейных ускорителей электронов.

Во второй главе диссертации представлены объекты и методы исследования. В качестве объектов исследований были выбраны: фторопласт, химические соединения вольфрама, полиметилсилоксановый модификатор, коллоидный графит. Подробно описаны их свойства. Раскрыт процесс радиационных испытаний с перечислением используемого оборудования и источников.

В третьей главе представлен способ создания гидрофобной оболочки на поверхности оксида и карбида вольфрама с помощью модифицирования кремнийорганической смолой К-9. Разработана технология и составы полимерного композита, в состав которого входит фторопласт, модифицированный карбид вольфрама или оксид вольфрама, а также коллоидный графит. Описан метод детонационного газотермического напыления, которым создается износостойкое защитное покрытие из карбида вольфрама и никеля на поверхности композита, что повышает микротвёрдость по Виккерсу с $5,38 \pm 0,32$ HV до $726,38 \pm 45,11$ HV для состава с модифицированным WO_3 и с $15,63 \pm 0,86$ HV до $752,12 \pm 36,12$ HV для состава с модифицированным WC. Показано, что добавкой коллоидного графита можно регулировать теплопроводность полимерного композита.

В четвертой главе изучено взаимодействие электронного пучка с полимерными композитами методом Монте Карло в программе CASINO, используя элементный химический состав и плотность составов. Диапазон исследуемых энергий 0,5-10 МэВ. Показано, что вклад ионизирующих потерь энергий электрона значительно превышает радиационные потери при прохождении через составы. Экспериментальным методом исследовано изменение характеристик полимерного композита после облучения электронами, которое привело к снижению прочности на изгиб. Обнаружена зависимость дозы облучения и изменения теплопроводности с теплоёмкостью.

В пятой главе исследовано тормозного рентгеновского и гамма-излучения с полимерными композитами. Для согласования данных и исключения ошибки проведено физико-математическое моделирование и экспериментальное

облучение материалов. Изучены радиационно-защитные характеристики полимерных композитов, а также изменение структуры и теплофизических характеристик под воздействием гамма-излучения. Показано, что ввод модифицированных оксида и карбида вольфрама в полтора и более раза уменьшает слой половинного ослабления гамма-излучения по сравнению с чистым полимером. Представлен метод модифицирования фторопластовых композитов для увеличения радиационной стойкости, который показал значительную эффективность за счёт радиационной закалки и сшивки с нанесённым защитным покрытием. Рассчитана необходимая толщина радиационной защиты ЛУЭ от тормозного рентгеновского излучения с энергией 10 МэВ, которая составляет 153 см для состава с 60 масс. % модифицированного WC, что на 123 см меньше необходимой для защиты толщины бетона.

В заключении приводятся итоговые выводы по работе, рекомендации для использования и перспективы дальнейших исследований.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, сформулированы на основании глубокого анализа научной информации, полученных экспериментальных результатов с использованием современных методов исследования, таких как, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, РФА, лазерная дифракция, реализованных на высокотехнологичном оборудовании. Кроме того, используемые компоненты соответствуют ГОСТ 10007-80, ТУ 48-4205-122-2019, ТУ 2228-352-09201208-96, ТУ 23.99.14-007-5382. Данные, полученные в ходе работы, не противоречат результатам изысканий других авторов и согласуются с основными научными представлениями в области радиационного материаловедения, а также согласуются с теоретическими расчётами. Выводы по главам и заключение научно обоснованы и отражают суть выполненных исследований.

Апробация работы на множестве международных и всероссийских научно-технических конференция также доказывает обоснованность и достоверность полученных результатов. Основные положения работы изложены в 19 научных

публикациях, в том числе: 6 работ – в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ; 3 работы – в зарубежных изданиях, индексируемых международными библиографическими базами данных Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ на изобретение № 2782759 и 2 свидетельства о регистрации ноу-хау (№ 20210019, № 20210040).

На основании вышеизложенного можно констатировать, что основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также заключение и рекомендации, являются теоретически обоснованными, достоверными и экспериментально подтвержденными.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. Предложен механизм модифицирования высокодисперсных оксида и карбида вольфрама полиметилсилоксановым олигомером, заключающийся в создании стабильных топохимических связей с поверхностью и образовании гидрофобной органосилоксановой оболочки для равномерного распределения наполнителей в объеме фторопластовой матрицы.

Установлена возможность повышения микротвердости поверхности фторопластовых композитов путем нанесения защитного покрытия на основе карбида вольфрама с металлическим никелем методом детонационного газотермического напыления. Создание высокоплотного слоя WC-Ni толщиной 110-115 мкм способствует снижению концентрации поглощенной дозы электронов в поверхностном слое полимерного композита и повышению его радиационной стойкости.

Предложен способ повышения теплопроводности фторопластовых композитов, заключающийся в добавлении коллоидного графита, обеспечивающего создание теплопроводных сетей, снижающих накопление избыточного тепла и электрического пробоя при электронном облучении.

Установлено, что повышенная радиационная стойкость разработанных фторопластовых композитов, подвергнутых гамма-облучению (^{60}Co , $E=1,25$ МэВ, $D=200$ кГр, $P=10$ Гр/с) обусловлена образованием парамагнитных центров

радикального типа (кремниевых $\text{Si}\cdot$ и пероксидных $\text{CFO}_2\cdot$) с протеканием рекомбинационной реакции между ними по радикальному механизму.

Научная и практическая ценность диссертации

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено решение научной задачи по получению композиционных материалов для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ», обладающих повышенными физико-механическими, теплофизическими свойствами и радиационной стойкостью.

Разработан способ модифицирования оксида и карбида вольфрама с использованием кремнийорганического полиметилсилоксанового олигомера (смола К-9 марки «А»). Показано, что растворение олигомера в толуоле и последующая ультразвуковая кавитация (40 кГц, N=1 кВт) в присутствии вольфрамсодержащих наполнителей повышает их краевой угол смачивания с $24,2 \pm 0,4^\circ$ до $127,9 \pm 6,2^\circ$ для WO_3 и с $26,5 \pm 2,8^\circ$ до $124,1 \pm 4,2^\circ$ для WC.

Разработаны составы и технология получения фторопластовых композиционных материалов, наполненных модифицированным оксидом и карбидом вольфрама. Оптимальное содержание модифицированных вольфрамсодержащих наполнителей составляет 60 масс. % (патент РФ № 2782759 на изобретение).

Установлены оптимальные параметры создания защитного покрытия на основе карбида вольфрама с никелем на поверхности композитов методом детонационного газотермического напыления: скорость прохода пушки 2000 мм/мин, расход порошка 1400 г/ч, расход азота для транспортировки порошка $0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$, частота детонации 20 Гц.

Установлен способ повышения теплопроводности композитов путем введения коллоидного графита в количестве от 3 до 10 масс. %. Введение коллоидного графита в количестве 10 масс. % повышает теплопроводность композиционных материалов в 1,5-1,8 раза.

Предложен механизм радиационно-термической модификации фторопластовых композитов в γ -пучке. Прочность при изгибе образцов,

наполненных (60 масс. %) модифицированными WO_3 и WC , повышается, соответственно, на 15 % и 20 %. При этом радиационная стойкость фторопластовых композитов возрастает в 45 раз ($4,5 \pm 0,2$ МГр, наполнитель WO_3) и 46 раз ($5,5 \pm 0,2$ МГр, наполнитель WC).

Представлены теоретические результаты расчетов взаимодействия ускоренных электронов, тормозного рентгеновского и гамма-излучения с исследуемыми полимерными композитами.

Радиационно-защитные характеристики для оптимального состава композита с 60 масс. % модифицированного WC оформлены в виде таблиц международного стандарта, которые обеспечивают теоретические расчеты при выполнении инженерных задач радиационной защиты.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021); международной научно-практической конференции «Перспективные технологии и материалы» (Севастополь, Севастопольский государственный университет, 2021); Образование. Наука. Производство. XIII Международный молодежный форум (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021); Образование. Наука. Производство. XIV Международный молодежный форум (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022); XV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ» (Кемерово, КузГТУ, 2023).

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы могут быть использованы в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики». Результаты, полученные в ходе работы, могут быть внедрены на предприятия использующие ЛУЭ с энергией до 10 МэВ.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы

При рецензировании диссертации и автореферата выявлены следующие недочеты и замечания:

1. Из текста диссертации и автореферата, а также прилагаемых актов неясно, как будет использоваться материал для радиационной защиты ЛУЭ, то есть будет выполнен в виде передвижных экранов; экранов, вмонтированных или являющихся частью строительных конструкций; экранов оборудования; экранов в средствах индивидуальной защиты?

2. В качестве физико-механическим испытаний были выбраны предел прочности на изгиб и микротвёрдость по Виккерсу, которые безусловно являются важными характеристиками, но для применения представленного полимерного композита в качестве радиационной защиты ЛУЭ необходимо привести данные по исследованию предела прочности на сжатие, чтобы понимать, как можно использовать данный материал и в какой геометрии. Например, в заключении указано, что толщина радиационной защиты из разработанного полимерного композита для ЛУЭ ($E=10$ МэВ) при кратности ослабления 10^7 составляет 153 см, учитывая возможную необходимость в высоком экране важно узнать какое давление выдержат нижние слои материала.

Отмеченные недостатки несколько не снижают значимости представленных автором результатов и общей положительной оценки работы Кашибадзе В.В.

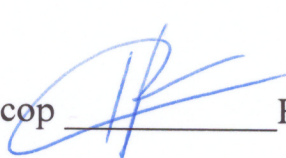
Заключение

Диссертация **Кашибадзе Виталия Валерьевича** на тему: «**Полимерные композиты, наполненные модифицированным оксидом и карбидом вольфрама, для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ**» выполнена на актуальную тему, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по получению композиционных материалов для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ», обладающих повышенными физико-механическими, теплофизическими свойствами и радиационной стойкостью, имеющей **существенную значимость** для развития соответствующей отрасли знаний фундаментального и прикладного характера

для физики конденсированного состояния. Результаты работы широко опубликованы и апробированы. Полученные в диссертации результаты, научные положения и сформулированные выводы обоснованы, достоверны, обладают новизной, имеют теоретическую и практическую значимость. Текст написан автором самостоятельно грамотным техническим языком, графический материал выполнен на высоком уровне.

По актуальности затронутых вопросов, научной новизне и практической значимости, числу публикаций диссертация на тему: «Полимерные композиты, наполненные модифицированным оксидом и карбидом вольфрама, для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ» соответствует требованиям, изложенным в пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. в действующей редакции), предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Кашибадзе Виталий Валерьевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры электроники МФТИ, Физтех федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» от 22.01.2025 года протокол № 1/25.

Доктор физ.-мат.наук, профессор  Никитов Сергей Апполонович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер.,9
Телефон: 8 (495) 408-59-44,

Адрес электронной почты: nikitov@cplire.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», кафедра электроники

Должность: заведующий кафедры электроники

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>