

ОТЗЫВ

официального оппонента Ушакова Ивана Владимировича
на диссертационную работу Кашибадзе Виталия Валерьевича
на тему: «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
(технические науки)

Актуальность темы диссертации, с точки зрения прикладной науки, обусловлена важностью защиты персонала и оборудования от ионизирующих излучений при эксплуатации линейных ускорителей электронов. Для достижения этой цели требуется создание радиационно-защитных композитов, которые будут обладать высокими радиационно-защитными характеристиками в условиях ограниченного пространства. Актуальность темы диссертации в фундаментально-научном аспекте обусловлена необходимостью выявления закономерностей связанных с совместимостью полимера фторопласта с радиационно-защитными наполнителями высокой плотности, с целью равномерного распределения в композиционных материалах. Кроме того, востребовано исследование возможностей повышения теплофизических свойств полимерных радиационно-защитных композитов с упрочнением их поверхностных слоёв, что позволит прогнозировать изменение их функциональных характеристик при воздействии высокоэнергетического электронного излучения.

Новизна результатов и сформулированных положений подтверждается уровнем решения поставленных в диссертационном исследовании задач, которые обеспечили успешную разработку технологии изготовления полимерных композитов для радиационной защиты линейных ускорителей электронов. Научная новизна исследования заключается в том, что автором 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 , $E=1,25\text{ МэВ}$, $D=200\text{ кГр}$, $R=10\text{ Гр/с}$) 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.

Практическая значимость работы заключается в разработке способа модифицирования оксида и карбида вольфрама с использованием кремнийорганического полиметилсилоксанового олигомера. Практическая значимость также обусловлена разработкой составов и технологии получения фторопластовых композиционных материалов, наполненных модифицированным оксидом и карбидом вольфрама. Кроме того, практическую значимость имеют определенные автором параметры создания защитного покрытия на основе карбида вольфрама с никелем (на поверхности композитов) методом детонационного газотермического напыления и установление способа повышения теплопроводности композитов путем введения коллоидного графита.

Достоверность полученных результатов обусловлена комплексом проведенных экспериментальных исследований с использованием современного сертифицированного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, использованием аттестованных методик и методов моделирования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, соответствуют общепризнанным физическим представлениям.

Материалы диссертации были опубликованы в 19 научных публикациях, в том числе: 6 работ – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных 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).

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

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

Во введении обоснована актуальность темы исследования, проанализирована степень ее разработанности, поставлена цель и задачи, сформулирована научная новизна полученных результатов, их значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, описаны методы и методология исследования, указаны сведения об апробации результатов и публикациях, представлен личный вклад автора.

В первой главе представлен литературный обзор по перспективам создания полимерных радиационно-защитных композиционных материалов для линейных ускорителей электронов, изучены нормативные требования к радиационной защите линейных ускорителей электронов и сделан системный анализ опубликованных в открытой печати многочисленных исследований по радиационной стойкости полимерных композиционных материалов.

Во второй главе приводится подробная характеристика всех компонентов полимерного композита, а также методики исследований и испытаний с указанием используемого оборудования.

В третьей главе исследованы закономерности модифицирования высокодисперсных наполнителей на основе оксида вольфрама (VI) и карбида вольфрама, а также описана технология получения полимерных композиционных материалов для линейных ускорителей электронов. Кроме того, в данной главе представлена методика газотермического напыления карбида вольфрама на поверхность полимерного композита, дана исчерпывающая информация на основе предварительных исследований по необходимости нанесения защитного покрытия и выбору наносимого материала. Практический интерес представляет исследование микротвёрдости по Виккерсу, которое показало, что создание защитного покрытия на поверхности полимерного композита многократно увеличивает его твердость, которая становится сопоставима с твердостью прочных металлических сплавов. Исследованы физико-механические и теплофизические характеристики полученных полимерных композиционных материалов.

Следует отметить представленный в данной главе способ повышения теплопроводности полимерных композитов путем введения добавки коллоидного графита. Показано, что теплопроводность постепенно увеличивается при введении коллоидного графита в пределах 3-5 масс. %, после чего резко увеличивается при содержании равном 10 масс. %.

Четвертая глава посвящена воздействию ускоренных электронов на полимерные композиционные материалы. Приведены результаты физико-математического моделирования взаимодействия ускоренных электронов с полимерными композиционными материалами, а также экспериментальные результаты. Показано, что наполнение оксидом вольфрама и карбидом вольфрама фторопластовой матрицы снижает расчётный эффективный пробег электронов.

Важными данными, с практической точки зрения, являются результаты исследования изменения теплопроводности и теплоемкости полимерных

композитов после облучения электронами. Таким образом, доза до 1 МГр приводит к повышению теплопроводности и снижению теплоемкости, а доза в 2 МГр приводит к противоположному эффекту.

В пятой главе представлены данные по воздействию тормозного рентгеновского и гамма-излучения на полимерные композиционные материалы методом физико-математического моделирования и экспериментальным методом. Данные, полученные обоими способами, хорошо согласуются между собой. Также проведено сравнение полученных радиационно-защитных характеристик с современными аналогами, где показано превосходство представленных полимерных композиционных материалов. Для снижения гамма-излучения с энергией 1,252 МэВ на 50 % требуется экран из композиционного материала с WO_3 (60 масс. %) толщиной $4,077 \pm 0,509$ см, для композиционного материала с WC (60 масс. %) потребуется толщина $3,151 \pm 0,329$. Показано, что облучение полимерных композитов гамма-квантами с энергией 1,25 МэВ до дозы в 2 МГр приводит к возрастанию теплопроводности и снижению теплоемкости. Ввод 60 масс. % наполнителя во фторопластовую матрицу позволил повысить радиационную стойкость в 10 и более раз по сравнению с чистым фторопластом.

Одним из главных достоинств работы является представленная автором радиационно-термическая модификация полимерных композитов в γ -пучке (^{60}Co), которая привела к повышению прочности на изгиб на 45 % для фторопласта и на 15-20% для полимерных композиционных материалов. Также многократно возросла радиационная стойкость фторопласта и композитов на его основе. Это возможно из-за процесса радиационной закалки фторопласта и радиационной сшивки полимерной матрицы с кремнийорганическим покрытием.

Заключение диссертационной работы содержит выводы выполненного исследования и рекомендации, степень обоснованности которых не вызывает сомнений, также автором обоснованы перспективы дальнейших исследований.

Таким образом, диссертационная работа Кашибадзе В.В. является законченным трудом, в котором установлены закономерности модифицирования

оксида и карбида вольфрама, а также нанесения защитного покрытия методом газотермического напыления. Установлена возможность повышения теплопроводности полимерных композитов и их радиационно-термическая модификация. Совокупность полученных результатов способствует разработке технологии получения полимерных композиционных материалов, а экспериментальные и теоретические исследования по воздействию электронного- и гамма- излучения на композиты, позволяет обосновать применение разработанных материалов для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ.

В качестве замечаний и пожеланий хотелось бы отметить следующее:

1. Из текста диссертации не понятно, почему для исследований были выбраны составы именно с 30 и 60 масс. % содержанием наполнителей.

2. Автором представлены экспериментальные данные по значительному увеличению микротвердости по Виккерсу после ввода наполнителей и после нанесения защитного покрытия на полимерный композит по сравнению с чистым фторопластом. Желательно теоретически объяснить физический механизм увеличения микротвердости

3. Автор, в разделе 4.2. указал, что для проведения исследований на предел прочности при изгибе применялась стандартная методика ГОСТ Р 57749-2017 (ИСО 17138:2014) для керамических композитов, но поскольку исследуются полимерные композиты, то данный выбор не вполне обоснован.

4. В разделе 5.4. указано, что радиационная стойкость полимерного композита после введения наполнителей значительно увеличилась, но всё равно ниже, чем у аналогов, вследствие чего и необходимо радиационно-термическое модифицирование. Рекомендуется охарактеризовать в числовом значении радиационную стойкость аналогов, поскольку словесное сравнение не информативно.

Данные замечания и рекомендации не влияют на общий высокий научный уровень проведенного исследования и значимость полученных результатов.

В заключение хочу отметить, что диссертация Кашибадзе Виталия Валерьевича представляет собой выполненную, законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой содержится решение актуальной научной задачи по получению композиционных материалов с высокими радиационно-защитными характеристиками от электронного, тормозного рентгеновского и гамма-излучения, обладающих повышенными физико-механическими, теплофизическими свойствами и радиационной стойкостью, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знания – физика конденсированного состояния. Диссертация и автореферат написаны грамотным техническим языком, оформлены в соответствии с требованиями ВАК РФ, материал изложен в логической последовательности. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В связи с вышеизложенным считаю, что диссертационная работа на тему: «Полимерные композиты, наполненные модифицированным оксидом и карбидом вольфрама, для радиационной защиты линейных ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ» полностью соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), а ее автор Кашибадзе Виталий Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки).

Официальный оппонент:

доктор технических наук по специальности
01.04.07 – Физика конденсированного
состояния, доцент, заведующий кафедрой
«Физики» Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Ушаков

Ушаков Иван Владимирович

«28» января 2025 г.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Ушаков Ушаков И.В.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Телефон: +7 499 230-24-69

E-mail: ushakoviv@mail.ru, ushakoviv@misis.ru

Адрес университета: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1

Сайт: <https://misis.ru>

ПОДПИСЬ Исаев ЗАВЕРЯЮ
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ И.М. Исаев

