

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

ЧИЖОВА Игоря Викторовича

«Структурно-фазовые состояния и физико-механические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN для космической техники», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

1. Соответствие диссертации специальностям и отрасли наук, по которым она представлена к защите

Диссертационное исследование Чижова И.В. посвящено изучению закономерностей формирования, структурно-фазового состояния, оптических, электрофизических и физико-механических характеристик наноструктурированных покрытий систем TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, полученных методом реактивного магнетронного распыления. В работе решается задача установления корреляций между технологическими параметрами ионно-плазменного осаждения, микроструктурой конденсированных сред и их эксплуатационными свойствами в условиях космического пространства.

Учитывая объект исследования (тонкопленочные наноконкомпозиты), предмет исследования (взаимосвязь «технология – структура – свойства») и полученные результаты, содержание работы полностью соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния (отрасль «физико-математические науки»). Диссертация отвечает пункту 2 раздела 3 паспорта специальности: «Элементный и фазовый состав, структура (строение) и физические свойства конденсированных сред (систем)». Таким образом, научные положения и выводы диссертации полностью укладываются в рамки заявленной специальности.

2. Актуальность темы диссертации

В современном материаловедении приоритетным направлением является разработка функциональных покрытий, способных эксплуатироваться в экстремальных условиях околоземного космического пространства. Конструкционные элементы космических аппаратов подвергаются комплексному воздействию вакуума, микрогравитации, высокоэнергетического излучения, термоциклирования и микрометеоритной эрозии. Обеспечение надежности узлов космической техники требует применения материалов с заданными трибомеханическими, терморегулирующими и радиационно-стойкими характеристиками. Традиционные технологии нанесения покрытий, в частности химическое осаждение из газовой фазы (CVD), имеют температурные ограничения, исключающие использование ряда конструкционных материалов.

В этом контексте технология реактивного магнетронного распыления представляет интерес как метод ионно-плазменной модификации поверхности, позволяющий формировать тонкопленочные структуры при относительно низких температурах с контролируемым фазовым составом. Фактором, сдерживающим широкое внедрение покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, является недостаточная изученность влияния легирующих добавок (Cu, Si, C) на структурно-фазовые превращения и комплекс физических свойств данных нитридных и карбонитридных систем.

В диссертации Чижова И.В. представлен оригинальный цикл экспериментальных исследований, направленных на разработку физико-технологических основ управления свойствами наноструктурированных покрытий на основе нитрида титана для нужд космической отрасли. Тема работы находится в русле приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156, и коррелирует с научными интересами школы ионно-лучевой и плазменной обработки материалов в БГУ.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

В диссертационной работе реализован оригинальный методологический подход к синтезу наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN методом реактивного магнетронного распыления с применением разработанной в БГУ системы модульного контроля и управления расходом газов (МКУРГ). Использование данной системы позволило обеспечить высокую стабильность магнетронного разряда и воспроизводимость процесса осаждения, что является критически важным для получения материалов с заданными свойствами.

К основным научным результатам, определяющим новизну работы, относятся:

1. определены условия стабилизации концентраций легирующих элементов в твердом растворе: меди в диапазоне 6,15–10,32 ат. % и кремния в диапазоне 6,49–10,05 ат. % при использовании композитных мишеней с содержанием данных элементов 8 ат. %. Зафиксирован эффект интенсификации кинетики роста пленок на 4,6 % (до скорости $v = 0,31–0,71$ нм/с) при введении ацетилена в реакционную газовую смесь;

2. проанализирована эволюция структурно-фазового состояния осаждаемых покрытий, заключающаяся в формировании однофазного неупорядоченного твердого раствора замещения кубической сингонии на базе ГЦК решетки типа NaCl (Ti, Al)N и (Ti, Al)(C, N), с сегрегацией меди и кремния в аморфном состоянии по границам кристаллитов, что обуславливает изменение среднего размера кристаллитов в диапазоне $D = 34–184$ нм;

3. получены корреляции между оптическими и электрофизическими характеристиками покрытий и их элементным составом: зафиксировано снижение коэффициента солнечного поглощения α_s на 38 % и эффективности фототермического преобразования η на 36 % при увеличении доли титана с 17 до 45 ат. %, и снижение удельного сопротивления $R_{уд}$ в 4–7,5 раз при концентрации меди 6,15–10,32 ат. % относительно покрытия TiAlN;

4. оценено влияние легирования на механические и трибологические характеристики: показано, что легирование кремнием повышает твёрдость H на 39 %, модуль Юнга E на 35 %, сопротивление пластической деформации H^3/E^{*2} на 63 %, упругое восстановление W_e на 21 %, добавка меди повышает индекс ударной вязкости H/E на 26 % и сопротивление пластической деформации H^3/E^{*2} на 72 %, а введение углерода обеспечивает снижение коэффициента трения μ на 12,5–21,6 % и скорости износа W на 82,9–97,6 %.

Новизна и оригинальность результатов подтверждается статьями в рецензируемых научных изданиях и докладами на международных конференциях.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность научных положений, выносимых на защиту, а также выводов и рекомендаций обеспечена применением комплекса взаимодополняющих методов диагностики. Исследование структурно-фазового состояния проводилось с использованием рентгеноструктурного анализа (РСА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), что позволило детально реконструировать морфологию и фазовый состав нанокompозитов. Физико-механические свойства изучались методами наноиндентирования и трибологического тестирования, а оптические и электрофизические характеристики определялись спектрофотометрией и четырехзондовым методом.

Все выводы сформулированы корректно, логически обоснованы обширным массивом экспериментальных данных и имеют законченный характер. Результаты исследований опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и находятся в хорошем согласии с данными, полученными другими авторами в области физики конденсированного состояния и технологий ионно-плазменного осаждения.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость результатов состоит в выяснении закономерностей формирования наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN в зависимости от технологических режимов ионно-плазменного

осаждения, установлении взаимосвязи структурно-фазовых превращений и физико-механических характеристик данных систем.

Практическая и экономическая значимость обусловлена разработкой физико-технологических основ создания функциональных покрытий для различных отраслей промышленности:

- аэрокосмическая техника: Создание терморегулирующих и защитных покрытий для элементов малых космических аппаратов, обеспечивающих тепловую стабильность и защиту от накопления электростатического разряда.

- машиностроение и инструментальное производство: Разработка высокотвердых, термостойких и износостойких покрытий для режущего, штампового и бурового инструмента, позволяющих увеличить ресурс эксплуатации в 2–5 раз.

- материалы для медицины: Получение биоинертных покрытий для эндопротезов (тазобедренные и коленные суставы, стоматологические имплантаты), сочетающих высокую твердость, коррозионную стойкость и биосовместимость.

- ядерная энергетика: Применение радиационностойких покрытий для защиты конструктивных элементов активной зоны реакторов от коррозии, водородного охрупчивания и радиационного распухания.

- микроэлектроника и сенсорика: Использование в качестве проводящих слоев в MEMS-системах и сенсорах, работающих в экстремальных условиях.

Социальная значимость работы состоит в использовании полученных результатов в учебном процессе высших учебных заведений. Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета (подтверждено соответствующим актом внедрения № 2.4/204 от 28.06.2023). Данная работа будет полезна в рамках подготовки специалистов по направлениям физики твёрдого тела, нанотехнологий, вакуумной и плазменной электроники, а также при выполнении курсовых, дипломных и научно-исследовательских работ. Это будет способствовать повышению качества физико-математической подготовки студентов и аспирантов, формированию у них компетенций в области современной науки о материалах и технологиях инженерии поверхности.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Материалы, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 40 научных работах, в том числе в 8 статьях в научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь (общим объемом 8,26

авторского листа), в 2 статьях в других научных изданиях, в 21 статье в сборниках материалов научных конференций и в 9 тезисах докладов. Результаты внедрены в учебный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (имеется 1 акт о внедрении). Получено свидетельство о депонировании и регистрации компьютерной программы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь (№ 1712-КП).

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Структура и оформление материалов диссертации и автореферата отвечают требованиям Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации, утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 28.02.2014 № 3 (в редакции постановления Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 22.08.2022 № 5).

Текст диссертации включает перечень сокращений и условных обозначений, введение, общую характеристику работы, пять глав, заключение, библиографический список и два приложения. Результаты исследования изложены последовательно и полно с использованием иллюстративного материала. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

8. Замечания по диссертации

1. В диссертационной работе убедительно показана перспективность покрытий TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN для применения в космической технике. Вместе с тем выводы о комплексной защите от факторов космического пространства сформулированы несколько шире, чем следует из объёма проведённых экспериментальных исследований. В работе не представлены специальные испытания покрытий при одновременном воздействии вакуума, термоциклирования, ультрафиолетового и ионизирующего излучения, атомарного кислорода и заряженных частиц.

2. При сопоставлении покрытий различного состава целесообразно было бы представить итоговую карту оптимизации или сводную таблицу, показывающую, какие составы и режимы нанесения являются предпочтительными для различных функциональных назначений: терморегулирующего покрытия, электропроводящего защитного слоя, износостойкого покрытия или многофункциональной структуры.

3. В тексте работы встречаются отдельные стилистические и терминологические неточности, а также случаи, когда следовало бы более строго унифицировать обозначения физических величин и индексов, используемых при описании механических характеристик покрытий.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы, не затрагивают основные положения, выносимые на защиту, и могут быть учтены автором при дальнейшем развитии исследований наноструктурированных покрытий для космического материаловедения.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Уровень выполненного исследования, представленного в диссертации Чиждова И.В., свидетельствует о высоком научном, экспериментальном и методическом уровне подготовки соискателя. В ходе работы был получен репрезентативный объем экспериментальных данных с привлечением современного комплекса методов исследования структурно-фазового состояния и физических свойств конденсированных сред. Соискатель продемонстрировал глубокое понимание физики процессов ионно-плазменного синтеза и структурообразования в тонких пленках. Научная квалификация Чиждова И.В. полностью соответствует требованиям, предъявляемым к соискателям ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

10. Заключение

Диссертационная работа Чиждова И.В. представляет собой завершённое фундаментально-прикладное исследование, выполненное на высоком научно-методическом уровне и полностью соответствующее требованиям Положения о присуждении учёных степеней в Республике Беларусь. Работа вносит существенный вклад в физику конденсированного состояния и решение прикладных задач создания многофункциональных покрытий для космической техники.

Считаю, что Чиждову И.В. обоснованно может быть присуждена учёная степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния за следующие научные результаты:

- разработаны физико-технологические основы формирования покрытий TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN методом реактивного магнетронного распыления с применением системы МКУРГ, обеспечивающей воспроизводимое осаждение наноструктурированных покрытий с контролируемым содержанием легирующих элементов (Cu: 6,15–10,32 ат. %; Si: 6,49–10,05 ат. %) при доле данных элементов в мишенях на уровне 8 ат. % и повышенной скоростью роста при добавлении ацетилена в реактивную смесь;

- установлены структурно-фазовые закономерности: во всём исследованном диапазоне реализуется однофазный неупорядоченный твёрдый раствор замещения кубической сингонии $(\text{Ti,Al})\text{N}$ и $(\text{Ti,Al})(\text{C,N})$. Показано, что Cu и Si не образуют выделенных фаз, а сегрегируют в аморфном состоянии по

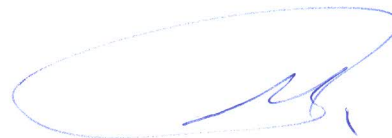
границам зёрен, позволяя целенаправленно варьировать размер кристаллитов в диапазоне 34–184 нм;

- выявлены корреляции «состав–оптические/электрофизические свойства»: увеличение доли Ti с 17 до 45 ат. % снижает коэффициент солнечного поглощения α_s на 38% и эффективность фототермического преобразования η на 36%, что позволяет управлять тепловым режимом малых космических аппаратов. Легирование Si снижает удельное сопротивление в 4–7,5 раз относительно TiAlN и предотвращая накопление электростатического разряда на поверхности малых спутников;

- обоснованы пути оптимизации трибомеханических характеристик: легирование Si повышает твёрдость на 39%, модуль Юнга на 35% и сопротивление пластической деформации на 63%; добавка Si увеличивает индекс ударной вязкости на 26%, а введение углерода снижает коэффициент трения на 12,5–21,6% и скорость износа на 82,9–97,6%, существенно повышая ресурс узлов трения.

Таким образом, диссертация Чижова И.В. является самостоятельной завершённой квалификационной работой, решающей актуальную задачу разработки покрытий с заданным комплексом свойств для экстремальных условий космической эксплуатации. Результаты опубликованы в 40 научных работах (в т. ч. 8 в рецензируемых изданиях), что подтверждает высокую научную квалификацию соискателя и полное соответствие работы требованиям, предъявляемым к кандидату физико-математических наук.

Официальный оппонент
профессор кафедры физики твёрдого тела
и нанотехнологий Белорусского государственного
университета, доктор физико-математических наук,
профессор



В. В. Углов

