

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию ЧИЖОВА Игоря Викторовича
«Структурно-фазовые состояния и физико-механические свойства
наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN
для космической техники», представленную на соискание ученой 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**

Диссертация Чижова Игоря Викторовича посвящена исследованию структурно-фазовых состояний наноструктурированных покрытий составов TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, сформированных методом реактивного магнетронного распыления, их оптических, электрофизических и физико-механических свойств, а также выявлению взаимосвязи между технологическими условиями формирования покрытий и эксплуатационными характеристиками, требуемыми при применении в космической технике. Анализ содержания работы показывает, что диссертация Чижова И. В. соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния по отрасли физико-математические науки, поскольку в ней объект исследования (покрытия варьируемого элементного состава, формируемые методом реактивного магнетронного распыления в различных режимах нанесения) и предмет исследования (элементный и фазовый составы, микроструктура, морфология получаемых покрытий, а также их электрофизические, оптические и трибомеханические свойства) согласуются с формулой специальности, утвержденной ВАК Республики Беларусь. В совокупности на основе анализа объекта и предмета исследования, полученных результатов, отраженных в выводах и положениях, выносимых на защиту, можно утверждать, что диссертационная работа Чижова И. В. полностью соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и отрасли «физико-математические науки».

2. Актуальность темы диссертации

К настоящему времени одним из наиболее важных направлений развития материаловедения является создание функциональных покрытий для эксплуатации в экстремальных условиях околоземного космического пространства. Космические аппараты и размещаемые в них приборы подвергаются воздействию высокоэнергетического электромагнитного излучения, микрометеоритных потоков, сильных перепадов температуры. Для обеспечения надежной работы узлов и агрегатов космической техники необходимы радиационно-стойкие материалы с высокими трибомеханическими

и терморегулирующими свойствами, к числу которых относятся покрытия на основе нитрида титана с модифицирующими добавками. Традиционные методы нанесения покрытий, такие как CVD, имеют ограничения по температуре процесса, что исключает использование ряда конструкционных материалов. Альтернативой является технология реактивного магнетронного распыления, позволяющая формировать тонкоплёночные слои с заданными свойствами при невысоких температурах. Для планомерного формирования таких покрытий требуется детальное исследование влияния легирующих добавок (таких как медь, кремний, углерод) на структурно-фазовое состояние и комплекс свойств нитридных и карбонитридных систем. В диссертационной работе Чижова И.В. представлен комплекс экспериментальных исследований по разработке физико-технологических основ процесса формирования наноструктурированных покрытий на основе нитрида титана, возможных к применению в космической технике.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, а также приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156.

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

Автором диссертации использован оригинальный подход к формированию наноструктурированных покрытий TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN варьированного состава методом реактивного магнетронного распыления с применением модульного комплекса управления расходом газов.

Научной новизной обладают следующие установленные закономерности и результаты:

- установлены физико-химические закономерности формирования покрытий TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN , заключающиеся в воспроизведении концентраций примесей меди в пределах 6,15–10,32 ат. % и кремния в пределах 6,49–10,05 ат. %, при использовании распыляемых мишеней с долей данных элементов 8 ат. %, и интенсификации скорости роста плёнок на 4,6 % до 0,31–0,71 нм/с при добавлении ацетилену;

- выявлены закономерности изменения структурно-фазового состояния осаждаемых покрытий, заключающиеся в формировании однофазного неупорядоченного твёрдого раствора замещения на базе гранцентрированной кубической решетки $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ и $(\text{Ti}, \text{Al})(\text{C}, \text{N})$, с сегрегацией меди и кремния в аморфном состоянии на границах кристаллитов, обеспечивающие изменение среднего размера кристаллитов в диапазоне 34–184 нм;

- экспериментально установлены зависимости оптических и электрофизических характеристик покрытий от их элементного состава, заключающиеся в снижении коэффициента поглощения солнечного излучения на 38 % и эффективности фототермического преобразования на 36 % при повышении доли титана в составе покрытия с 17 до 45 ат. %, и снижении удельного сопротивления в 4–7,5 раз при концентрации меди 6,15–10,32 ат. % по отношению к TiAlN;

- установлены закономерности изменения механических и трибологических характеристик, заключающиеся в том, что введение кремния в состав покрытий повышает твёрдость на 39 %, значение модуля Юнга на 35 %; добавка меди повышает индекс ударной вязкости на 26 %; а введение углерода обеспечивает снижение коэффициента трения на 12,5–21,6 % и скорости износа на 82,9–97,6 %.

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

Обоснованность и достоверность представленных в работе положений, выносимых на защиту, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием взаимодополняющих методов исследования и базируются на достоверных принципах исследования физических свойств и структуры тонкопленочных материалов. Выводы сформулированы корректно, обоснованы, имеют законченный характер и содержат все необходимые ссылки на литературные источники. Результаты исследований опубликованы в рецензируемых журналах и согласуются с результатами, полученными другими авторами.

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

Научная значимость результатов диссертационной работы заключается в выяснении закономерностей формирования наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN в зависимости от технологических режимов процесса, установлении структурно-фазовых превращений и физико-механических характеристик данных систем.

Практическая и экономическая значимость заключается в том, что полученные физико-технологические основы процесса формирования покрытий позволят создавать высокотвёрдые, термостойкие и износостойкие покрытия для режущего, штампуемого и бурового инструментов, позволяющие увеличить срок их эксплуатации; функциональные покрытия в аэрокосмической технике, обеспечивающие тепловую и механическую защиту компонентов летательных аппаратов; долговечные биоинертные

покрытия для медицинских имплантатов и эндопротезов (тазобедренные, коленные суставы, стоматологические штифты), где требуются высокая твёрдость, износостойкость, устойчивость к коррозии и биосовместимость; радиационностойкие покрытия для ядерной энергетики, в частности, для защиты элементов активной зоны реакторов от коррозии, водородного охрупчивания и радиационного распухания; тонкоплёночные элементы сенсорных, термоэлектрических и микроэлектромеханических систем, функционирующих при высоких температурах, агрессивных средах и переменных нагрузках.

Социальная значимость работы состоит в использовании полученных результатов в учебном процессе высших учебных заведений. Материалы диссертационной работы внедрены в образовательный процесс факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета (подтверждено соответствующим актом № 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 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 образовательный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (имеется акт об использовании).

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с «Инструкцией 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

В тексте диссертации допущены, скорее всего, по недостаточной внимательности не вполне корректные определения измеряемых величин.

Так, при описании процесса осаждения покрытий и влияния режимов осаждения на их характеристики имеются разночтения в определении величины «степень реактивности»:

«... степень реактивности газовой смеси ...» – с. 31;

«... степень реактивности α сформированных посредством реактивного магнетронного распыления нитридных ... покрытий.» – с. 53;

«... степень реактивности α процесса их формирования ...» – с. 64.

При описании методики и результатов исследования оптических свойств формируемых слоев физическая величина «коэффициент поглощения солнечного излучения» в тексте, таблицах и в подписях к рисункам диссертации и автореферата многократно названа как «коэффициент солнечного поглощения». В то же время используется и корректное наименование этой величины.

Однако отмеченные недостатки не затрагивают принципиальные выводы работы и не снижают научной и практической ценности диссертации.

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

Диссертационная работа Чижова И.В. представляет собой завершенное исследование, проведенное на высоком научном, экспериментальном и методическом уровне. В рамках ее выполнения соискатель получил большой объем экспериментальных результатов с привлечением комплекса современных методов исследования. Научная квалификация соискателя Чижова И.В. соответствует присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

10. Заключение

Диссертация Чижова И.В. «Структурно-фазовые состояния и физико-механические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN для космической техники», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по уровню научной

новизны и практической значимости соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, содержит новые научные результаты в области физики конденсированного состояния и вносит вклад в развитие научного направления – создания функциональных покрытий для космической техники.

Ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния Чижову Игорю Викторовичу может быть присуждена за получение новых научно-обоснованных результатов, включающих:

- установление закономерностей формирования на основе нитрида титана методом реактивного магнетронного распыления в режиме, при котором в состав рабочей смеси в качестве легирующих добавок вводятся из распыляемых мишеней атомы Cu или Si и добавлен ацетилен в качестве источника углерода при давлении $7,0 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложек 350–450 °С, однофазных наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN толщиной до 3,35 мкм с концентрацией легирующих элементов: меди 6,15–10,32 ат. % и кремния 6,49–10,05 ат. %;

- выявление зависимостей оптических и электрофизических характеристик формируемых покрытий от их состава, заключающихся в снижении коэффициента поглощения солнечного излучения на 38 % и их удельного сопротивления в 4,0–7,5 раз при оптимальных концентрациях легирующих добавок, что позволяет использовать покрытия для терморегуляции и защиты от накопления электростатического заряда на корпусах малых космических аппаратов;

- установление закономерностей изменения механических характеристик формируемых покрытий, приводящих к повышению твердости на 39 % при добавлении в их состав кремния, повышению индекса ударной вязкости на 26 % при добавлении меди, и снижению коэффициента трения на 12,5–21,6 % и скорости износа на 82,9–97,6 % при введении в состав углерода.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики
УО «Белорусский государственный технологический университет»

В.В. Поплавский

24 апреля 2026 г.

