

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ

Объект авторского права

УДК 539.216.2; 538.951; 538.958; 539.219

ЧИЖОВ
Игорь Викторович

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОКРЫТИЙ $TiAlCuN$, $TiAlCuCN$, $TiAlSiN$, $TiAlSiCN$ ДЛЯ
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск 2026

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете и Научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета.

Научный руководитель

Константинов Станислав Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории элионики Научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты:

Углов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета

Поплавский Василий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики факультета информационных технологий Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация


Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «7» мая 2026 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.06.01 при Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению») по адресу: 220072, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19, пом. 5. Тел. +375(17)275-13-13 (учёный секретарь совета), e-mail: iftprnanb@physics.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Автореферат разослан « 3 » апреля 2026 г.

Учёный секретарь совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук

 Д. В. Карпинский

ВВЕДЕНИЕ

Наноструктурированные керамические покрытия на основе нитрида и карбида титана являются перспективными в силу их уникальных физико-технических свойств, которые позволяют использовать их в качестве защитных сверхтвёрдых структур, износостойчивых проводящих плёнок, пассивных терморегулирующих покрытий малых космических аппаратов, а также как декоративные долговечные покрытия. На сегодняшний день актуальным направлением развития материаловедения является модификация хорошо изученных материалов с целью значительного улучшения определённых свойств без вреда для прочих, важных характеристик. Достоверно известно, что добавление алюминия в нитрид титана улучшает ряд механических свойств, а добавление в состав композита углерода позволяет оптимизировать защитное покрытие для задач, связанных с трением и изнашиванием.

Формирование наноструктурированных керамических покрытий сопряжено с необходимостью понимания взаимосвязи между условиями реактивного магнетронного распыления и структурно-фазовым состоянием, а также с механическими, оптическими, трибологическими и электрофизическими свойствами получаемых покрытий. Кроме того, требуется обеспечить высокую технологичность, что необходимо для стабильной воспроизводимости результата.

Влияние добавок меди и кремния на процесс формирования, механические и оптические свойства композитного материала на основе нитрида титана недостаточно изучены, а карбонитридные варианты покрытий и вовсе не представлены в публикациях.

Исходя из этого, исследование влияния режимов реактивного магнетронного распыления на структурно-фазовое состояние, оптические, электрофизические и механические свойства нитридных TiAlCuN , TiAlSiN и карбонитридных TiAlCuCN , TiAlSiCN покрытий является актуальной задачей, представляющей интерес не только для фундаментальных исследований в области физики конденсированного состояния, но и для решения прикладных проблем в задачах космического материаловедения, машиностроения, а также для оптимизации фототермических преобразователей солнечного излучения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в Белорусском государственном университете и Научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета в рамках плана НИР БГУ. 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 7 мая 2020 г. № 156. Диссертационная работа выполнялась в рамках следующих научных проектов и государственных программ:

1. НИР «Разработка функциональных наноструктурных нитридных и карбонитридных покрытий на модифицированные сплавы алюминия и титана для условий аэрокосмического применения» в рамках комплексного задания «Разработка и модифицирование алюминиевых и титановых сплавов с наноструктурными карбонитридными покрытиями с высокими функциональными свойствами для условий аэрокосмического применения», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)), ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», 2021–2025 годы (№ госрегистрации 20211642) (научный руководитель – С. В. Константинов).

2. НИР «Разработка радиационно-стойких наноструктурированных покрытий на основе нитридов и карбонитридов металлов с высокими функциональными трибомеханическими свойствами» в рамках комплексного задания «Разработка научных основ и технологий формирования композиционных покрытий электрохимическими методами», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы», ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы (№ госрегистрации 20211643) (научный руководитель – С.В. Константинов).

3. НИОК(Т)Р «Разработка радиационностойких, антибликовых, терморегулирующих, обеспечивающих электромагнитную совместимость систем электроники, функциональных материалов, структур и покрытий для аэрокосмических и специальных систем и комплексов» в рамках мероприятия 32 «Разработать новые материалы, покрытия и системы для защиты радиоэлектронного, оптоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от внешних энергетических воздействий, обеспечения их экологической и информационной безопасности, высокой функциональной надёжности и работоспособности» подпрограммы 2 «Освоение в производстве новых и высоких технологий» государственной программы «Наукоёмкие технологии и техника» на 2021–2025 годы (№ госрегистрации 20220013) (научный руководитель – академик НАН Беларуси Ф.Ф. Комаров), договор с ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» № 2021-26-328/2 от 03.12.2021.

4. Задание 56 «Разработать и изготовить комплекс для исследования влияния факторов околоземного космического пространства на эксплуатационные характеристики аэрокосмических материалов в составе специального практикума по материаловедению» подпрограммы 10.2 «Научно-учебное оборудование» государственной научно-технической программы 10

«Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» на 2021–2025 годы. № 20220014 от 10.01.2022 (научный руководитель – академик НАН Беларуси Ф. Ф. Комаров).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы заключается в установлении взаимосвязи между составом, особенностями структуры и, соответственно, физико-механическими свойствами покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN от технологических условий их формирования методом реактивного магнетронного распыления (варьирование компонентного состава мишеней, режимов нанесения, легирующих компонентов).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– определение элементного состава покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, полученных посредством мишеней с различным отношением титана и алюминия, с варьированием напуска реактивных газов, с добавлением в состав мишени меди и кремния;

– выявление зависимости особенностей структурно-фазового состояния покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, полученных с использованием различных мишеней, с варьированием отношения металлической к неметаллической компоненте, с внесением добавок меди и кремния в состав мишени, напуска ацетилен в вакуумную камеру;

– установление влияния режимов нанесения, а также состава и структуры покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN на их оптические, терморегулирующие, электрофизические, механические и трибологические свойства.

Объект исследования – покрытия TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN варьированного элементного состава, формируемые методом реактивного магнетронного распыления в различных режимах нанесения.

Предметом исследования являлись элементный и фазовый составы, микроструктура, морфология, электрофизические, оптические, а также трибомеханические свойства покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении следующих результатов, практически важных для создания новых материалов для космической техники.

Посредством реактивного магнетронного распыления сформированы твёрдые наноструктурированные покрытия TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN. Установлено влияние режимов нанесения и состава исходных мишеней на фазовый состав, структуру, а также физические и трибомеханические свойства указанных наноструктурированных покрытий.

Впервые экспериментально установлены зависимости электрофизических, оптических, механических и трибологических характеристик от варьирования условий нанесения методом реактивного магнетронного распыления для покрытий нитридов TiAlCuN, TiAlSiN и карбонитридов TiAlCuCN, TiAlSiCN.

Показано, что формирование покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN с определённым типом структуры и фазовым составом можно обеспечить путём контролируемого управления элементным составом, изменением отношения металлической к неметаллической компоненте, внесением дополнительных компонентов в состав мишени, а также добавлением реактивного газа ацетилена.

Установлено, что посредством управления режимами нанесения, варьированием компонентного состава мишеней, добавлением реактивного газа ацетилена возможно изменение значений коэффициентов поглощения солнечного излучения α_s , термического излучения ϵ_0 , равновесной температуры T_p и эффективности фототермического преобразования η покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN в широких пределах. Покрытия такого рода подходят для применений в аппаратах космической техники (в качестве терморегулирующих проводящих защитных покрытий) и для увеличения коэффициента полезного действия фототермических преобразователей.

Показано, что путём подбора оптимальных параметров нанесения можно обеспечить формирование методом реактивного магнетронного распыления покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN с улучшенными трибомеханическими свойствами (повышенная твёрдость H , модуль Юнга E , устойчивость к ударным нагрузкам H/E^* , повышенная сопротивляемость пластической деформации H^3/E^{*2} , сниженный коэффициент трения μ и улучшенная износостойкость).

Эти результаты вносят вклад в развитие перспективной области физики конденсированного состояния – космического материаловедения.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные 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 мишеней с долей данных элементов 8 ат. %; интенсификации скорости роста покрытий на 4,6 % до $v = 0,31–0,71$ нм/с при добавлении ацетилена C_2H_2 к реактивной смеси в пропорции $C_2H_2/N_2 = 0,32–0,76$ и обеспечивающие формирование карбонитридных наноструктур TiAlCuCN, TiAlSiCN с требуемым соотношением компонент.

2. Закономерности изменения структурно-фазового состояния осаждаемых покрытий, заключающиеся в формировании, при степени реактивности

$\alpha = 0,42-0,61$, однофазного неупорядоченного твёрдого раствора замещения кубической сингонии ($Fm\bar{3}m$) на базе гранцентрированной кубической решётки типа NaCl (Ti, Al)N, в случае композиций TiAlCuN, TiAlSiN, с варьированием узловых положений атомов титана Ti и алюминия Al, и (Ti, Al)(C, N), в случае композиций TiAlCuCN, TiAlSiCN, с варьированием положений атомов азота N и углерода C в октаэдрических порах ячейки; сегрегации меди Cu и кремния Si в аморфном состоянии на границах кристаллитов фаз (Ti, Al)N и (Ti, Al)(C, N), обеспечивающие изменение среднего размера кристаллитов в диапазоне $D = 34-184$ нм, и отсутствие выделенных самостоятельных фаз данных элементов, при концентрации Cu 6,15–10,32 ат. % и Si 6,49–10,05 ат. %.

3. Экспериментально установленные зависимости оптических и электрофизических характеристик покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN от их элементного состава, заключающиеся в: снижении коэффициента солнечного поглощения α_s на 38 % и эффективности фототермического преобразования η на 36 % при повышении доли титана Ti с 17 до 45 ат. %; снижении удельного сопротивления $R_{уд}$ в 4–7,5 раз при концентрации меди Cu 6,15–10,32 ат. % и оптимальных условиях нанесения относительно TiAlN, что позволит предотвращать локальное скопление заряда на поверхности малых космических аппаратов и повысит надёжность и долговечность эксплуатации.

4. Установленные закономерности изменения механических и трибологических характеристик наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, заключающиеся в том, что относительно системы TiAlN, внесение кремния Si повышает твёрдость H на 39 %, увеличивает 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 %; внесение углерода в состав покрытий TiAlCuCN, TiAlSiCN обеспечивает снижение коэффициента трения μ на 12,5–21,6 % и скорости износа W на 82,9–97,6 % относительно покрытий TiAlCuN, TiAlSiN.

Личный вклад соискателя учёной степени

Положения, выносимые на защиту, результаты теоретических и экспериментальных исследований были получены соискателем самостоятельно под руководством кандидата физико-математических наук, доцента Константинова С.В., который определял направления исследований, их цели и задачи, принимал участие в обсуждении и анализе полученных результатов. Вклад соавторов основных научных публикаций заключается в оказании технической консультации (Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, В. А. Зайков), проведении совместных экспериментов с использованием технологии реактивного магнетронного распыления (В. А. Зайков), исследовании покрытий методом наноиндентирования (С. В. Константинов),

определении элементного состава и структуры посредством сканирующей электронной микроскопии (Д. В. Жигулин), рентгеноструктурного анализа образцов (В. А. Кукареко), трибомеханических испытаний (В. В. Пилько), установлении оптических свойств (М. Н. Жукова), а также в обсуждении полученных результатов исследований. Остальные соавторы работ занимались изучением вопросов, не затрагивающих основные результаты, представленные в диссертации.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (г. Минск, Беларусь, 2021, 2023); International Conference «Electron beam technologies» (Varna, Bulgaria, 2022); International Conference «Ion implantation and other applications of ions and electrons» (Kazimierz Dolny, Poland, 2022); Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Витебск, Беларусь, 2022, 2024); Конгрессе «Восьмой белорусский космический конгресс» (г. Минск, Беларусь, 2022); Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (г. Минск, Беларусь, 2022); Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (г. Минск, Беларусь, 2022, 2023 и 2024); Международной научно-технической конференции «Приборостроение» (г. Минск, Беларусь, 2022, 2024); Международной научно-технической конференции «Опто-, микро- и СВЧ- электроника – 2022» (г. Минск, Беларусь, 2022); Международной научно-практической конференции «Цифровизация агропромышленного комплекса» (г. Тамбов, Россия, 2022); Международной научной конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (г. Минск, Беларусь, 2022, 2023 и 2024); International Conference «On surfaces, coatings and nanostructured materials» (Athens, Greece, 2023); Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью – 2023» (г. Ярославль, Россия, 2023); Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (г. Минск, Беларусь, 2023); Международной научно-практической конференции «Беларусь – Узбекистан: формирование рынка инновационной продукции» (г. Минск, Беларусь, 2023); International Symposium «K-TRIB2023» (Busan, Korea, 2023); Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (г. Минск, Беларусь, 2023); International Congress «Energy Fluxes and Radiation Effects» (Tomsk, Russia, 2024);

По результатам диссертации получено свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права.

Результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (получен акт о

внедрении) и имеют потенциальную возможность использования в производственных процессах предприятий космической и машиностроительной отрасли.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты исследований опубликованы в 40 научных работах, в том числе в 8 статьях в научных рецензируемых журналах в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 8,26 авторского листа), 2 статьях в других научных изданиях, 21 статье в сборниках материалов международных научных конференций и в 9 тезисах докладов. Получено свидетельство о депонировании и регистрации компьютерной программы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь (№ 1712-КП).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 196 страниц, в том числе 31 таблица занимает 18 страниц, 76 рисунков на 34 страницах, список использованных источников содержит 248 наименований на 24 страницах, включая 40 публикаций соискателя на 4 страницах, 2 приложения на 6 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава представляет собой аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены современные подходы к созданию наноструктурированных тонкоплёночных структур для космического назначения, особенностей их эксплуатации, предъявляемые требования к механическим характеристикам в космосе, вопросы терморегуляции малых космических аппаратов и требования к электрофизическим свойствам в космическом материаловедении. Проведён критический анализ существующих экспериментальных и теоретических исследований, посвящённых изучению наноструктурированных покрытий.

Также показаны перспективы применения покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN в промышленности. Сформулированы цели и задачи исследования, а также обоснована актуальность решаемых в диссертационной работе проблем.

Вторая глава посвящена методологии процесса формирования и исследования свойств наноструктурированных материалов и покрытий, где описывается методика осаждения тонкоплёночных покрытий, в частности, методом реактивного магнетронного распыления с применением модуля контроля управления расходом реактивных газов (МКУРГ) из парогазовой фазы. Также освещены подходы к

исследованию состава, структурно-фазового состояния и морфологии покрытий, в том числе методами: сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Также рассмотрены методы анализа оптических свойств покрытий, методика исследования электрофизических свойств наноструктурированных материалов, методы изучения микромеханических параметров керамических покрытий и технология исследования трибологических характеристик тонкоплёночных структур.

Осаждение нитридных и карбонитридных покрытий методом реактивного магнетронного распыления производилось с использованием композитных мишеней. В мишени № 1, с добавкой кремния соотношение атомных долей равно $Ti:Al \approx 1:1$, а для мишени № 2 соотношение – $Ti:Al \approx 3:1$. Аналогичный подход применялся при изготовлении мишеней с добавлением меди Cu (№ 3 – $Ti:Al \approx 1:1$, № 4 – $Ti:Al \approx 3:1$). Доля кремния и меди в составе мишеней составляла 8 ат. % соответственно.

Нанесение осуществлялось на модернизированной установке УВН-2М, оснащённой магнетронным распылителем и ионным источником «Радикал», системами нагрева подложек, подачи напряжения смещения на подложку и модульным комплексом управления расходом газов (МКУРГ).

Рентгеноструктурный и фазовый анализ покрытий $TiAlCuN$ осуществлялся с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра ADANI PowDiX 600/300 компании ADANI Systems с фокусировкой по Брэггу – Brentano. Длина волны излучения $CoK\alpha$ составляла $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$.

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием электронного микроскопа Hitachi SU 3400 была изучена структура и морфология полученных покрытий. Микроскоп был оснащён датчиком рентгеновского излучения (энергодисперсионным спектрометром), позволяющим определять элементный состав исследуемых покрытий методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Толщину покрытия изучали с помощью СЭМ-микрофотографий, сколов образцов на подложках из кремния Si и оксида кремния SiO_2 . Морфология поверхности исследовалась при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) NANOEDUCATOR II NT-MDT (Россия). Спектры отражения от покрытий регистрировались на установке LAMBDA-1050 UV-VIS (Perkin Elmer) в диапазоне длин волн 190–2500 нм. Поверхностное сопротивление R_{\square} покрытий измерялось четырёхзондовым методом посредством цифрового прибора ИУС-3. Измерения производились в центре образца при комнатной температуре, погрешность измерений не превышала 2 %. Микромеханические характеристики полученных покрытий исследовались методом наноиндентирования по методике Оливера и Фарра на приборе NanoHardness Tester (NHT2) CSM Instruments (Швейцария), оснащённом алмазным индентором Берковича. При анализе коэффициент Пуассона принимался равным $\nu = 0,3$. Исследования износостойкости проводились по методике «диск на плоскости». Процесс изнашивания покрытий выполнялся на воздухе в условиях сухого

трения, вращающегося контртела со скоростью 0,5 об/с относительно неподвижного образца. Диаметр вращающегося диска – 60 мм. Значение нагрузки, приложенной по нормали к поверхности исследуемых покрытий, составляло 200 мН. Время испытаний – 1500 с. Для измерения площади треков износа использовался оптический микроскоп Opto-EduA13 3601-T, оснащенный цифровой USB-камерой.

Третья глава посвящена анализу элементного состава, структурно-фазового состояния и исследованию морфологии сформированных нитридных TiAlCuN, TiAlSiN и карбонитридных TiAlCuCN, TiAlSiCN покрытий.

Посредством энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии были получены данные об элементном составе образцов. Спектры отличаются интенсивностью линий Ti и Al, величиной линии азота N и наличием линий газовых примесей: O и Ar. Присутствие в составе покрытия кислорода O находится на уровне разрешающей способности измерительного оборудования и не оказывает значительного влияния на свойства полученных покрытий. Введение газа ацетилена в вакуумную камеру установки магнетронного нанесения приводит к существенному росту линии углерода C на спектре изготовленных образцов. Концентрация кремния Si в сформированных покрытиях близка к его уровню в использованных мишенях № 1 и № 2 во всех режимах нанесения и находится в пределах 6,49–10,05 ат. %. Аналогичная ситуация для покрытий с добавкой меди, полученных при помощи мишеней № 3 и № 4, где концентрация меди Cu находится в пределах 6,15–10,32 ат. %.

Для образцов, полученных посредством мишеней № 1 и № 3, соотношение титана Ti к алюминию Al – Ti/Al находится в пределах 0,62–0,85. Покрытия, полученные посредством мишеней № 1 и № 4, показывают отношения Ti/Al в пределах 2,09–3,2. Установлено, что карбонитриды TiAlSiCN, TiAlCuCN имеют на 11 % большую толщину h , на 4,6 % большую скорость осаждения v , относительно нитридных покрытий TiAlSiN и TiAlCuN.

Анализ СЭМ-микрофотографий поверхностей и сколов сформированных покрытий указывает на прямое влияние соотношения металлической компоненты к неметаллической на морфологию покрытий с добавкой меди Cu (рисунок 1). Внесение углерода C в состав покрытия приводит к уменьшению среднего размера кристаллитов, формированию преимущественно глобулярной структуры, делая материал более однородным по поверхности и по глубине. Покрытие, сформированное с использованием мишени № 3 (образец 3N1), характеризуется куполообразными зёрнами на поверхности, а для покрытия, полученного при помощи мишени № 4, характерна заострённая форма зёрен. Нитридам, сформированным с избытком металлической компоненты (образцы 4N2, 3N2), свойственна более мелкозернистая структура, чем покрытиям, сформированным со стехиометрическим соотношением компонентов (образцы 3N1, 4N1). Опираясь на анализ поперечных сечений покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, можно отметить, что покрытия обладают высокой адгезионной способностью.

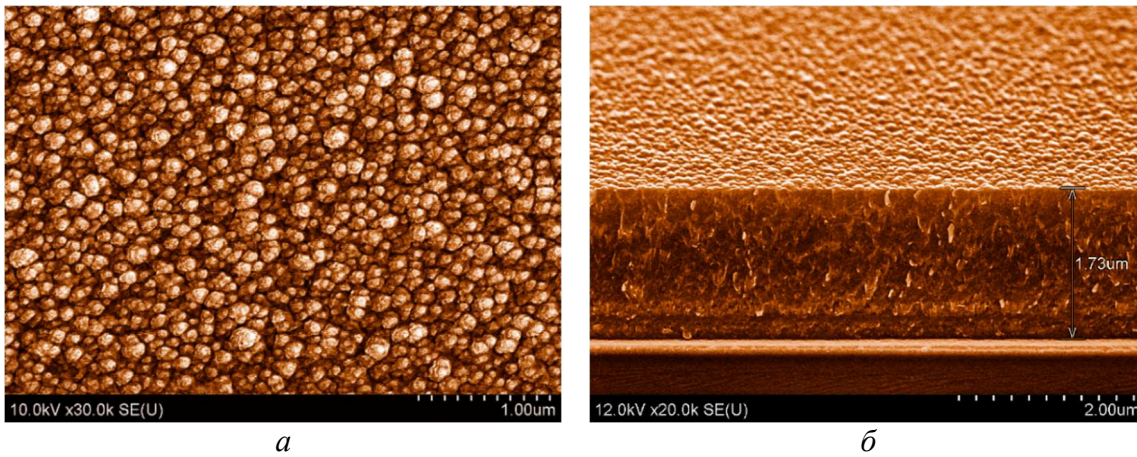


Рисунок 1 – СЭМ поверхности (а) и скола (б) покрытия TiAlCuN (образец 3N1), подложка Si, масштаб 1 мкм (а) и 2 мкм (б)

Из рентгеноструктурного анализа сформированных покрытий следует, что все используемые режимы осаждения приводят к образованию однофазной структуры, представленной $(Ti, Al)N$ и $(Ti, Al)(C, N)$ неупорядоченным твёрдым раствором замещения кубической сингонии ($Fm\bar{3}m$). Отсутствие каких-либо карбидных фаз (рисунок 2) в случае покрытий TiAlCuCN, TiAlSiCN указывает на то, что углерод С находится в октаэдрических порах нитрида титана и замещает атомы азота N, атомный радиус которых меньше ($R_C = 0,77 \text{ \AA}$, $R_N = 0,7 \text{ \AA}$). Также обнаружено замещение титана атомами алюминия ($R_{Ti} = 1,46 \text{ \AA}$, $R_{Al} = 1,43 \text{ \AA}$).

Для медьсодержащих и кремнийсодержащих покрытий наблюдается общая тенденция (см. рисунок 2), когда повышение доли металлической компоненты Ti + Al в составе приводит к повышению интенсивности пиков дифракции $(Ti, Al)(C, N)$ 111 и $(Ti, Al)N$ 111, а с ростом доли азота и углерода N + C происходит снижение их интенсивности. Кроме этого, в случае значительного избытка металлической компоненты $(Ti + Al)/(N + C) = 1,791$ в случае образца 4N2 в зоне рефлекса 222 наблюдается начало спиновальной фазовой сегрегации твёрдого раствора на TiN и AlN, чего не происходит при легировании покрытия углеродом С. Так образец 4CN2 с высокой долей металла $(Ti + Al)/(N + C) = 1,935$ в плоскости 222 не демонстрирует раздвоения пика дифракции.

Влияние режимов нанесения на примере образцов керамических покрытий 4N1 и 4N2 (см. рисунок 2) показывает, что повышение доли титана Ti с 30,55 до 43,27 ат. % привело к сдвигу пика дифракции в область больших углов (с $42,84^\circ$ до $43,07^\circ$) для $(Ti, Al)N$ 111, $(Ti, Al)N$ 220 (с $73,18^\circ$ до $73,28^\circ$) и $(Ti, Al)N$ 222 (с $93,99^\circ$ до $94,34^\circ$). Аналогичный результат наблюдается при анализе карбонитридных покрытий 4CN1 и 4CN2 (сдвиг угла с $42,48^\circ$ до $42,93^\circ$) при повышении концентрации титана с 35,76 до 44,42 ат. %. Насыщение углеродом С наноструктурированных керамических покрытий сместило пики дифракции в область меньших углов (см. рисунок 2), что наблюдается при сравнении образцов 4N1 и 4CN1 (сдвиг $(Ti, Al)N$ 111 и $(Ti, Al)(C, N)$ 111

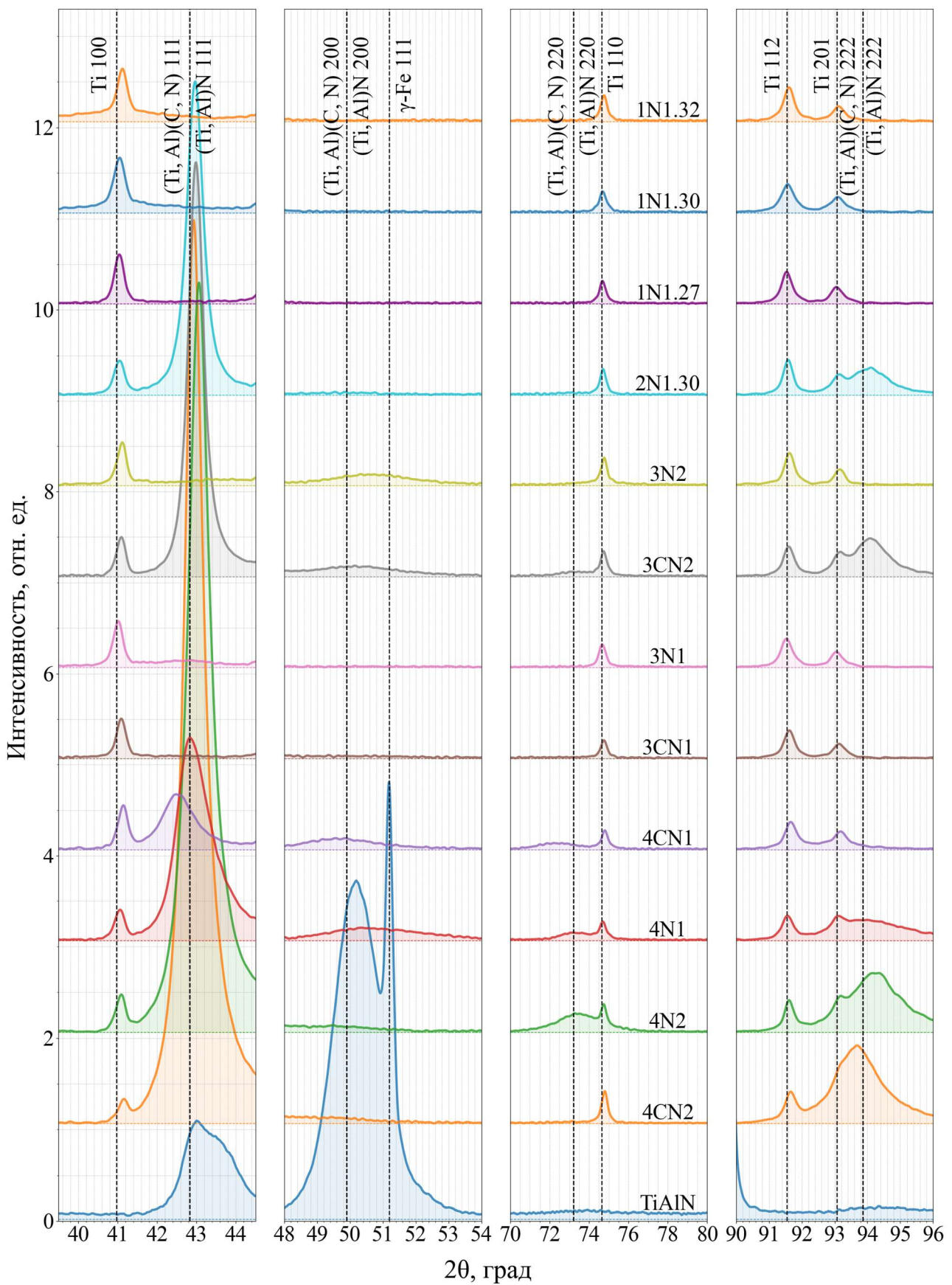


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы от нитридных TiAlSiN, TiAlCuN, TiAlN и карбонитридных покрытиях TiAlSiCN, TiAlCuCN, сформированных на подложках из титана марки ВТ1-0 и стали марки 12Х18Н10Т

с $42,84^\circ$ до $42,48^\circ$ при содержании углерода 3,68 и 18,14 ат. % соответственно), аналогичная ситуация наблюдается при анализе покрытий $4N_2$ и $4CN_2$ (при концентрации углерода 3,6 и 8,77 ат. %, сдвиг $(Ti, Al)N$ 111 и $(Ti, Al)(C, N)$ 111 с $43,07^\circ$ до $42,93^\circ$, для $(Ti, Al)N$ 222 и для $(Ti, Al)(C, N)$ 222 наблюдается смещение пика дифракции с $94,34^\circ$ до $93,68^\circ$). Для нитрида $TiAlCuN$ средний размер кристаллитов составил $D \approx 53$ нм, а для карбонитрида $TiAlCuCN$ – $D \approx 105$ нм. В плоскости 111 размер кристаллитов D варьируется от 39 нм до 184 нм, для плоскости 222 – $D = 38–95$ нм, для плоскости 200 – $D = 35–68$ нм, для плоскости 220 – $D = 34–58$ нм. Минимальный измеренный параметр решётки составил $a = 4,1935$ Å, а максимальное значение $a = 4,2827$ Å. С повышением концентрации алюминия Al для рефлекса 111 у нитридных покрытий $TiAlCuN$ обнаружено увеличение межплоскостного расстояния d и периода решётки a на 0,51 %.

Четвёртая глава сфокусирована на анализе влияния компонентного состава и структурно-фазового состояния на оптические свойства покрытий $TiAlCuN$, $TiAlCuCN$, $TiAlSiN$, $TiAlSiCN$. Коэффициенты поглощения солнечного излучения α_s и коэффициенты излучения ε_0 для нитридных $TiAlCuN$, $TiAlSiN$ и карбонитридных $TiAlCuCN$, $TiAlSiCN$ покрытий рассчитывались согласно теории по формулам:

$$\alpha_s = \frac{\int_0^{\infty} A(\lambda) P_{\lambda}^i d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}^i d\lambda}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) P_{\lambda}^{bb}(T) d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}^{bb}(T) d\lambda}, \quad (2)$$

где P_{λ}^i – спектральная плотность мощности падающего солнечного излучения;
 $P_{\lambda}^{bb}(T)$ – спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела;
 $A(\lambda)$ – коэффициент спектрального поглощения;
 $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения;
 λ – длина волны падающего излучения.

Для оценки эффективности преобразования падающего излучения в тепловую энергию, вычисляется коэффициент фототермического преобразования η по формуле:

$$\eta = B\alpha_s - \frac{\varepsilon_0 \sigma T^4}{Q_{sol}}, \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана;
 $Q_{sol} = 150$ кВт/м² – мощность концентрированного солнечного излучения на единицу площади;

T – температура покрытия, коэффициент $B = 0,91$.

График зависимости коэффициента поглощения солнечного излучения α_s от концентрации титана Ti для кремнийсодержащих TiAlSiN, TiAlSiCN и медьсодержащих TiAlCuN, TiAlCuCN покрытий показан на рисунке 3. Установлено, что с ростом содержания титана Ti в покрытии последнее начинает демонстрировать всё более металлическое поведение, а при снижении доли металла – увеличивает свою поглощательную способность для солнечного излучения α_s .

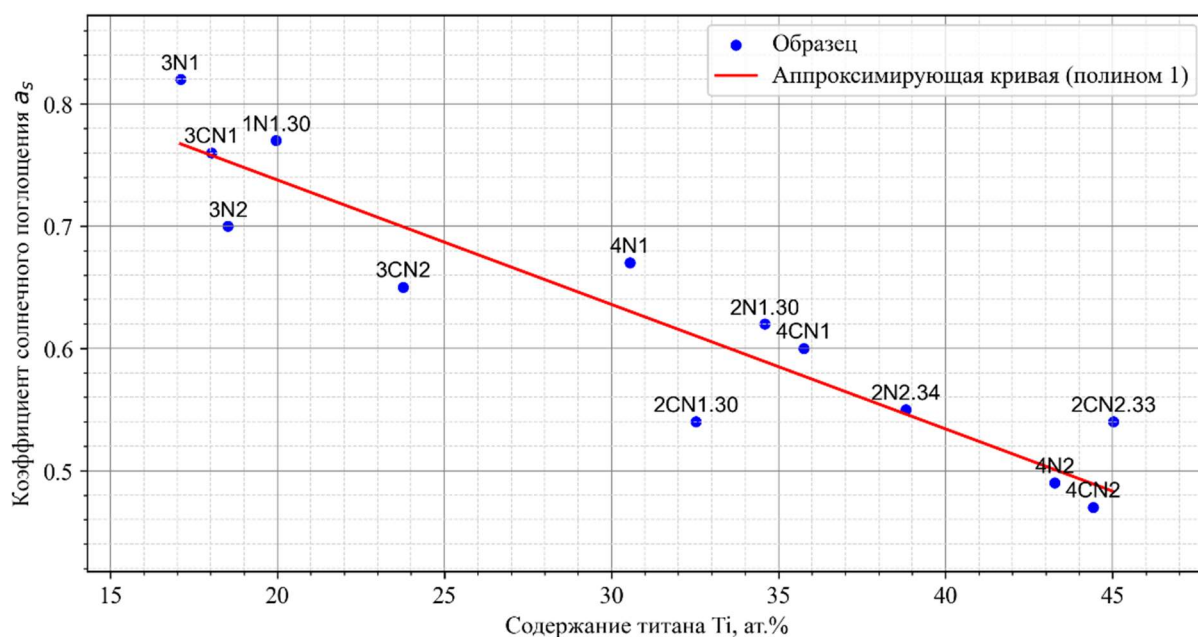


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента солнечного поглощения α_s от концентрации титана Ti для покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN, TiAlCuN, TiAlCuCN

Установлено, что добавление меди Cu в состав покрытия TiAlCuN при оптимальных условиях нанесения (образец 4N2) приводит к уменьшению удельного сопротивления $R_{уд}$ от 4 до 7,5 раз по сравнению с покрытием TiAlN. Это происходит за счет сегрегации меди по границам кристаллитов с формированием высокопроводящей аморфной прослойки (рисунок 4).



1 – кристаллиты *nc* (nanocrystal) – TiAlN или TiAlCN, 2 – аморфная межзёренная прослойка с кремнием Si *a* (amorphous) – Si или медью Cu
Рисунок 4 – Схематичное изображение наноструктуры покрытий с Cu и Si

Сформированные нитридные TiAlCuN, TiAlSiN и карбонитридные TiAlCuCN, TiAlSiCN покрытия являются проводящими (по критерию $R_{\square} \leq 250 \text{ кОм}/\square$) и способны препятствовать локальному скоплению заряда. Это свидетельствует о том, что покрытия являются пригодными для применения в задачах космической техники в качестве защитных электропроводящих структур.

Пятая глава посвящена изучению механических и трибологических свойств нитридных и карбонитридных покрытий. На рисунке 5 показаны кривая нагрузки – разгрузки, а также микрофотография отпечатка индентора на поверхности покрытия TiAlCuN. Минимальное значение твёрдости среди всех исследуемых керамических покрытий зафиксировано у покрытия TiAlCN – $H = 17,1 \text{ ГПа}$, а максимальная твёрдость получена для TiAlSiN – $H = 49 \text{ ГПа}$. Минимальное значение модуля Юнга $E = 176,3 \text{ ГПа}$ обнаружено у покрытия TiAlCuCN, а максимальное значение установлено на образце TiAlSiCN – $E = 506,1 \text{ ГПа}$. Индекс ударной вязкости исследуемых нитридных и карбонитридных композитов варьируется в пределах $H/E^* = 0,06–0,15$. Сопротивляемость пластической деформации находится в широких пределах $H^3/E^{*2} = 0,07–0,68$. Минимальная доля упругого восстановления $W_e = 36,2 \%$ зафиксирована на образце TiAlCN, а максимальное значение $W_e = 70,9 \%$ характерно для покрытия нитрида TiAlSiN. Экспериментально установлено, что за счёт внесения добавок меди Cu и кремния Si, достигаются большие значения твёрдости покрытий относительно бинарных и тернарных нитридов.

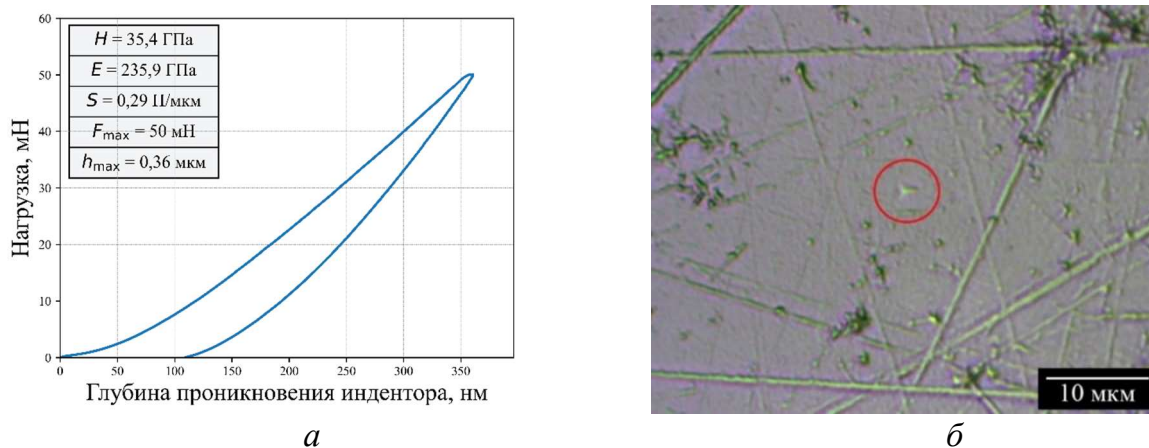


Рисунок 5 – Кривая нагрузки-разгрузки (а) и отпечаток индентора (б) от покрытия TiAlCuN, нанесённого в режиме 1 с использованием мишени № 3

Карбонитрид TiAlSiCN демонстрирует наилучшие свойства среди полученных покрытий, в частности, на 62,82 % меньший коэффициент трения μ , в сравнении с TiAlCN. Полученные образцы обеспечивают меньший коэффициент трения μ , относительно TiN, TiAlN, AlTiN, CrAlN. Экспериментально установлено, что покрытия с добавкой углерода C TiAlCuCN, TiAlSiCN демонстрируют общее снижение значений коэффициента трения μ на 12,5–21,6 % и скорости изнашивания W на 82,9–97,6 % в сравнении с нитридными покрытиями TiAlCuN, TiAlSiN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Состав формируемых покрытий с добавками Cu и Si напрямую зависит от состава мишеней. Содержание Si в покрытиях (6,49–10,05 ат. %) близко к его концентрации в мишенях № 1 и № 2 (8 ат. %) при всех режимах нанесения. Концентрация Cu в покрытиях, полученных при помощи мишеней № 3 и № 4 (с концентрацией 8 ат. %), демонстрирует аналогичное поведение и составляет 6,15–10,32 ат.%. Отмечено повышение скорости осаждения плёнок до $v = 0,31–0,71$ нм/с (в среднем на 4,6 %) при добавлении ацетилена ($C_2H_2/N_2 = 0,32–0,76$) с образованием карбонитридных структур TiAlCuCN и TiAlSiCN [1–А – 6–А, 9–А, 10–А, 12–А, 14–А, 15–А, 17–А, 24–А – 26–А, 28–А, 29–А, 33–А, 38–А].

2. Покрытия с добавками меди Cu и кремния Si демонстрируют однофазную структуру в нитридной (Ti, Al)N и карбонитридной (Ti, Al)(C, N) форме. Эта структура представляет собой неупорядоченный твёрдый раствор замещения кубической сингонии ($Fm\bar{3}m$) с гранцентрированной кубической решёткой. Наблюдается замещение атомов Ti атомами Al в узлах решётки и замещение атомов N атомами C в октаэдрических порах. Введение Si и Cu не приводит к формированию выделенных фаз, однако модифицирует зёрненную структуру, изменяя размер кристаллитов. Структура покрытий TiAlSiN представляет собой кристаллическую фазу (Ti, Al)N, (Ti, Al)(C, N) и аморфную фазу Si_3N_4 , за счёт чего достигаются высокие трибомеханические характеристики. В случае покрытия TiAlCuN медь Cu сегрегирует по границам кристаллитов [1–А – 6–А, 9–А, 10–А, 14–А, 15–А, 17–А, 21–А, 24–А, 26–А, 27–А, 29–А, 31–А, 32–А, 34–А – 36–А, 38–А, 40–А].

3. Покрытия с добавкой меди по сравнению с кремнийсодержащими вариантами демонстрируют на 7 % больший коэффициент поглощения солнечного излучения α_s , на 20 % больший коэффициент излучения ϵ_0 , на 12 % меньшее отношение α_s/ϵ_0 , на 26 % меньшую равновесную температуру T_p и на 7 % большую эффективность фототермического преобразования η . При увеличении содержания титана Ti в покрытиях с кремнием и медью с 17 ат. % до 45 ат. % наблюдается снижение коэффициента солнечного поглощения α_s на 38 % и эффективности фототермического преобразования η на 36 %, позволяя снизить нагрев малого космического аппарата [7–А, 8–А, 11–А, 12–А, 19–А, 20–А, 22–А, 26–А, 36–А].

4. Методом реактивного магнетронного распыления сформированы проводящие нитридные TiAlCuN, TiAlSiN и карбонитридные TiAlCuCN, TiAlSiCN покрытия, способные препятствовать локальному скоплению заряда и соответствующие критерию проводимости $R_{\square} \leq 250$ кОм· \square^{-1} . Определены значения удельного сопротивления $R_{уд}$: TiAlSiN: $9,2–426 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; TiAlSiCN: $5,1–236 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; TiAlCuN: $1,5–58,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; TiAlCuCN: $2,2–69,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Покрытие TiAlCuN способно снизить $R_{уд}$ в 4–7,5 раз относительно TiAlN при оптимальных условиях синтеза [7–А, 8–А, 11–А, 19–А, 20–А, 22–А, 26–А, 32–А, 36–А].

5. Покрытия с добавкой меди, полученные при соотношении Ti:Al \approx 1:1, в сравнении с покрытиями, полученными с Ti:Al \approx 3:1, имеют на 7 % большую твёрдость H , на 8 % меньшие значения модуля Юнга E , на 22 % больший индекс ударной вязкости H/E^* , на 58 % большую сопротивляемость пластической деформации H^3/E^{*2} , на 35 % большую долю упругого восстановления W_e . Добавка меди Cu в покрытиях TiAlCuN, TiAlCuCN

приводит к повышению твёрдости H на 7 %, снижает модуль Юнга E на 13 %, повышает индекс ударной вязкости H/E^* на 26 %, сопротивление пластической деформации H^3/E^{*2} на 72 % и упругое восстановление W_e на 8 % относительно TiAlN.

Покрyтия с кремнием, полученные при соотношении компонент Ti:Al \approx 1:1, относительно покрyтий, полученных с Ti:Al \approx 3:1, имеют на 17 % меньшую твёрдость H , на 12 % меньшие значения модуля Юнга E , на 4 % меньший индекс ударной вязкости H/E^* , на 25 % меньшую сопротивляемость пластической деформации H^3/E^{*2} , на 11 % меньший вклад упругого восстановления W_e . Добавление кремния Si в состав покрyтий TiAlSiN, TiAlSiCN относительно TiAlN обеспечивает повышение твёрдости H на 39 %, увеличивает модуль Юнга E на 35 %, индекс ударной вязкости H/E^* на 6 %, сопротивление пластической деформации H^3/E^{*2} на 63 %, а также упругое восстановление W_e на 21 % [2–А – 6–А, 9–А – 11–А, 13–А, 16–А – 18–А, 22–А, 23–А, 25–А, 26–А, 28–А, 29–А, 34–А, 38–А, 39–А, 41–А].

6. Покрyтия с медью, полученные при соотношении Ti:Al \approx 1:1 относительно образцов, нанесённых при Ti:Al \approx 3:1, демонстрируют на 6 % меньшее значение среднего коэффициента трения μ_{cp} , на 30 % меньшую глубину трека износа $h_{изв}$, на 12 % меньшую длину трека износа L . Для кремнийсодержащих покрyтий TiAlSiN и TiAlSiCN, полученных посредством мишени № 1, наблюдается на 16 % большие значения среднего μ_{cp} коэффициента трения и значительно большие по размеру лунки износа, в сравнении с покрyтиями, сформированными с использованием мишени № 2.

Внесение углерода C в состав покрyтий TiAlCuCN, TiAlSiCN снижает коэффициент трения μ на 12,5–21,6 % и скорость износа W на 82,9–97,6 %, относительно нитридов TiAlCuN, TiAlSiN [2–А – 6–А, 9–А – 11–А, 13–А, 16–А, 17–А, 22–А, 23–А, 25–А, 26–А, 28–А, 29–А, 30–А, 34–А, 37–А – 39–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическая значимость результатов диссертационного исследования состоит в создании новых эффективных функциональных терморегулирующих покрyтий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN для малых космических аппаратов и систем космической техники. Разработанные покрyтия позволят обеспечить надёжность и долговечность эксплуатации систем бортовой электроники космической техники. Полученные научно-практические результаты представляют интерес для промышленных предприятий Республики Беларусь: ОАО «ИНТЕГРАЛЬ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛЬ», ОАО «МАЗ», ОАО «Планар» и другие.

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 конденсированного состояния, 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий

1–А. Константинов, С. В. Воздействие высокотемпературного ионного облучения на наноструктурированные покрытия TiAlN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, Е. Жук, В. А. Зайков // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 39–47.

2–А. Komarov, F. F. Structure and mechanical properties of TiAlN coatings under high-temperature Ar⁺ ion irradiation / F. F. Komarov, S. V. Konstantinov, J. Żuk, A. Drożdziel, K. Pyszniak, I. V. Chizhov, V. A. Zaikov // Acta Physica Polonica A. – 2022. – Vol. 142, № 6. – P. 690–696.

3–А. Константинов, С. В. Структурно-фазовые состояния и микромеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 101–110.

4–А. Komarov, F. F. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions // F. F. Komarov, S. V. Konstantinov, I. V. Chizhov, V. A. Zaikov, T. I. Zubar, A. V. Trukhanov // RSC Advances. – 2023. – iss. 13. – P. 18898–18907.

5–А. Комаров, Ф. Ф. Структура и микромеханические свойства покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN, сформированных методом реактивного магнетронного распыления / Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 241–252.

6–А. Константинов С. В. Эффект влияния углерода на структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков, В. В. Пилько // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2023. – № 3. – С. 44–56.

7–А. Константинов, С. В. Оптические и электрофизические свойства нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий: влияние режимов реактивного магнетронного нанесения / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 162–176.

8–А. Константинов, С. В. Влияние режимов нанесения наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий на их структуру, оптические и электрофизические свойства / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков, Д. В. Жигулин // Журнал

Статьи в других научных изданиях

9–А. Константинов, С. В. Зависимость механических свойств покрытий TiAlN от флюенса высокотемпературного облучения ионами аргона / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, Е. Жук, В. А. Зайков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2022. – Кн. 1: Материаловедение. – С. 126–135.

10–А. Константинов, С. В. Влияние режимов нанесения на микромеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2023. – Т. 2. – С. 101–113.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

11–А. Konstantinov, S. V. Structure and electrophysical properties of thermal control nanostructured coatings TiAlN, TiAlCN / S. V. Konstantinov, F. F. Komarov, V. A. Zaykov, I. V. Chyzhou // Actual problems of solid state physics = Актуальные проблемы физики твердого тела : proc. of the IX Intern. Sci. Conf., Minsk, 22–26 Nov. 2021 : in 2 bk. / Nat. Acad. of Sciences, Sci. and Pract. Center of the Nat. Acad. of Sciences of Belarus for Materials Science. – Minsk, 2021. – Bk. 1. – P. 172–176.

12–А. Константинов, С. В. Влияние высокотемпературного ионного облучения на структуру и твердость покрытий TiAlN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Актуальные проблемы прочности : материалы междунар. науч. конф. (Витебск, 23–27 мая 2022 г.) : посвящ. 30-летию со дня образования Межгос. коорд. совета по физике прочности и пластичности материалов / [под ред. В. В. Рубаника]. – Мн., 2022. – С. 296–298.

13–А. Константинов, С. В. Влияние концентрации углерода на структуру и трибомеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию основания гос. науч. учреждения «Ин-т порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа» (Минск, 14–16 сент. 2022 г.) / [редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.), П. А. Витязь и др.]. – Мн., 2022. – С. 545–551.

14–А. Константинов, С. В. Структурно-фазовое состояние и микромеханические свойства DLC-покрытий после облучения ионами He⁺ с энергией 500 кэВ / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. Н. Пархоменко, И. В. Чижов // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : сб.

науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова. – Мн., 2022. – С. 94–99.

15–А. Зайков, В. А. Влияние добавок меди на состав, структуру и электрофизические свойства тонкопленочных покрытий TiAlCuN и TiAlCuCN / В. А. Зайков, С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. А. Романов, И. В. Чижов // Материалы и структуры современной электроники : материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / [редкол.: В. Б. Оджаяев (гл. ред.) и др.]. – Мн., 2022. – С. 397–403.

16–А. Константинов, С. В. Облучение потоком кислородной плазмы наноструктурированных покрытий TiAlN, TiAlCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. Н. Пархоменко, И. В. Чижов, В. Н. Черник // Восьмой Белорусский космический конгресс : материалы конгр., 25–27 окт. 2022 г., Минск : [в 2 т. / науч. ред.: С. В. Кругликов, И. В. Филипченко]. – Мн., 2022. –Т. 2. – С. 134–138.

17–А. Константинов, С. В. Свойства наноструктурированных нитридных покрытий TiAlCuN для микромеханических приборов / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Приборостроение – 2022 : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., 16–18 нояб. 2022 г., Минск, Респ. Беларусь / [редкол.: О. К. Гусев (пред.) и др.]. – Мн., 2022. – С. 447–448.

18–А. Комаров, Ф. Ф. Твердые и износостойкие карбонитридные покрытия TiAlCN для агропромышленной техники / Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, И. В. Чижов, В. А. Зайков // III Международная научно-практическая конференция «Цифровизация агропромышленного комплекса», Тамбов, 25–27 октября 2022 г = III International scientific and practical conference «Digitalization of agroindustrial complex», Tambov, October 25–27, 2022 : сб. науч. ст. : в 2 т. / редкол.: Муромцев Д. Ю. [и др.]. – Тамбов, 2022. – Т. 2. – С. 17–20.

19–А. Konstantinov, S. V. High-fluence Ar⁺ ion irradiation effect on the structure and properties of CrAlN coatings / S. V. Konstantinov, F. F. Komarov, E. Wendler, I. V. Chizhov // Актуальные проблемы физики твердого тела = Actual problems of solid state physics : сб. докл. X Междунар. науч. конф., 22–26 мая 2023 г., Минск / [редкол.: В. М. Федосюк (пред.) и др.]. – Мн., 2023. – С. 662–665. – 1 CD-ROM.

20–А. Комаров, Ф. Ф. Твердые нитридные и карбонитридные покрытия TiAlCuN, TiAlCuCN: структура и свойства / Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Беларусь – Узбекистан: формирование рынка инновационной продукции : сб. материалов науч.-практ. конф. (Минск, 14–15 марта 2023 г.). – Мн., 2023. – С. 100–102.

21–А. Константинов, С. В. Структура и механические свойства наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков //

Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. 13-го Междунар. симп. (Минск, 5–7 апр. 2023 г.) : в 2 ч. / [редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) и др.]. – Мн., 2023. – Ч. 2. – С. 283–290.

22–А. Константинов, С. В. Влияние добавки кремния на элементный состав и структуру покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., 18–19 мая 2023 г., [г. Минск] / редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2023. – С. 319–321.

23–А. Komarov, F. F. Radiation tolerance and blistering effect of nanostructured CrAlN coatings under high-fluence Ar⁺ ion irradiation / F. F. Komarov, E. Wendler, S. V. Konstantinov, I. V. Chizhov // Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2023» : сб. тр. XXVI Междунар. конф., Ярославль, Россия, 21–25 авг. 2023 г. : в 2 т. – М., 2023. – Т. 2. – С. 46–49.

24–А. Константинов, С. В. Влияние добавок меди, кремния и углерода на микромеханические свойства покрытий TiAlN для космической техники / С. В. Константинов, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Взаимодействие излучений с твердым телом: [ВИТТ - 2023] : материалы 15-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 26–29 сент. 2023 г. / [редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) и др.]. – Мн., 2023. – С. 395–397.

25–А. Константинов С. В. Оптические и электрофизические свойства наноструктурированных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, М. Н. Жукова, В. А. Зайков // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова. – Мн., 2023. – С. 137–142.

26–А. Зайков В. А. Электрофизические и оптические свойства тонкопленочных покрытий TiAlCuN / В. А. Зайков, С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. Я. Демидова, Ю. В. Болотина // Квантовая электроника : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 21–23 нояб. 2023 г.) / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М. М. Кутейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Мн., 2023. – С. 142–146.

27–А. Зайков В. А. Влияние добавок кремния на электрофизические и оптические свойства тонкопленочных покрытий TiAlN / В. А. Зайков, А. А. Михалёнок, С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, А. Р. Лученок // Квантовая электроника : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 21–23 нояб. 2023 г.) / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М. М. Кутейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Мн., 2023. – С. 147–150.

28–А. Константинов, С. В. Электрофизические свойства наноструктурированных

нитридных покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN в задачах космического приборостроения / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Приборостроение – 2023 : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф., 15–17 нояб. 2023 г., Минск, Респ. Беларусь / [редкол.: О. К. Гусев (пред.) и др.]. – Мн., 2023. – С. 234–235.

29–А. Константинов, С. В. Трибомеханические свойства наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков, В. А. Лисневский // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка = New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 22–24 мая 2024 г.) / [редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) и др.]. – Мн., 2024. – С. 545–551.

30–А Константинов, С. В. Трибологические характеристики нитридных и карбонитридных покрытий на основе титана с добавками меди и кремния / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Актуальные проблемы прочности : материалы LXVIII междунар. науч. конф. (Витебск, 27–31 мая 2024 г.) : посвящ. 75-летию со дня рождения чл.-кор. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. Рубаника В. В. / [под ред. В. В. Рубаника]. – Мн., 2024. – С. 362–364.

31–А. Константинов, С. В. Воздействие протонного облучения на структурно-фазовое состояние покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова. – Мн., 2024. – С. 102–106.

Тезисы докладов на конференциях

32–А. Konstantinov, S. V. Mechanical properties of Ar⁺ irradiated TiAlN coatings / S. V. Konstantinov, F. F. Komarov, I. V. Chizhov, V. A. Zaikov // Electron Beam Technologies (EBT – 2022) : proc. of the Fourteen Intern. conf. on EBT., Varna, Bulgaria, 26 June – 1 July 2022. – Sofia, 2022. – P. 49.

33–А. Komarov, F. F. TiAlN coatings blistering under high-temperature Ar⁺ ion irradiation / F. F. Komarov, S. V. Konstantinov, J. Żuk, I. V. Chizhov, V. A. Zaikov // Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons : proc. of the 13th Intern. Conf., ION 2022 : Kazimierz Dolny, Poland, June 27–30, 2022. – Warsaw, 2022. – P. 60.

34–А. Комаров, Ф. Ф. Анализ структуры и фазового состава терморегулирующих наноструктурированных покрытий TiAlCN для систем космической электроники / Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2022 : сб. тез. II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 сент. 2022 г. / НАН Беларуси. – Мн., 2022. – С. 46.

35–А. Konstantinov S. V. High-fluence Ar⁺ ion irradiation effect on the structure and properties of CrAlN coatings / S. V. Konstantinov, F. F. Komarov, E. Wendler, I. V. Chizhov //

Актуальные проблемы физики твердого тела = Actual problems of solid state physics : сб. тез. X Междунар. науч. конф., 22–26 мая 2023 г., Минск. – Мн., 2023. – С. 294.

36–А. Комаров Ф. Ф. Структура и оптические свойства покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN космического назначения // Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, И. В. Чижов, М. Н. Кольчевская, В. А. Зайков // Актуальные проблемы физики твердого тела = Actual problems of solid state physics : сб. тез. X Междунар. науч. конф., 22–26 мая 2023 г., Минск. – Мн., 2023. – С. 329.

37–А. Konstantinov, S. V. Tribomechanical properties of nanostructured TiAlCuN coatings deposited by reactive magnetron sputtering for spacecrafts / S. V. Konstantinov, I. V. Chizhov, F. F. Komarov, V. A. Zaikov // K-TRIB2023 3rd Korea-Tribology International Symposium, Apr. 2–5, 2023, BEXCO, Busan, Korea : extended abstr. – [Seoul], 2023. – P. 161.

38–А. Komarov, F. F. Mechanical properties of nanostructured TiAlCuCN coatings for spacecraft application / F. F. Komarov, S. V. Konstantinov, I. V. Chizhov, V. A. Zaikov // Surfaces, coatings and nanostructured materials (NANOSMAT 2023) : abst. book 14th Intern. conf., Athens, Greece, 10–14 July 2023. – [Athens], 2023. – P. 29.

39–А. Константинов, С. В. Влияние режимов магнетронного распыления на трибологические свойства TiAlCuN, TiAlCuCN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов, В. А. Зайков // Приборостроение - 2024 = Instrumentation engineering - 2024 : материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф., 26–29 нояб. 2024 г., Минск, Респ. Беларусь / [редкол.: А. И. Свистун (пред.) и др.]. – Мн., 2024. – С. 126.

40–А. Konstantinov, S. V. Effect of 500 keV proton irradiation on structure of TiAlCuN, TiAlCuCN coatings deposited by reactive magnetron sputtering / S. V. Konstantinov, F. F. Komarov, I. V. Chizhov, V. A. Zaikov, V. V. Pilko // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024) : abstr. (Sept. 16–21, 2024, Tomsk, Russia). – Tomsk, 2024. – P. 414.

Свидетельство о регистрации и депонировании объекта авторского права

41–А. Компьютерная программа «NanoHardInfo»: свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1712-КП от 01.04.2024 / Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов, И. В. Чижов

РЭЗІЮМЭ

Чыжоў Ігар Віктаравіч

СТРУКТУРНА-ФАЗАВЫЯ СТАНЫ І ФІЗІКА-МЕХАНІЧНЫЯ УЛАСЦІВАСЦІ НАНАСТРУКТУРАВАННЫХ ПАКРЫЦЦЯЎ TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN ДЛЯ КАСМІЧНАЙ ТЭХНІКІ

Ключавыя словы: рэактыўнае магнетроннае распыленне, нанаструктураваныя пакрыцці, структурна-фазавы стан, цвёрдасць, модуль Юнга, індэкс ударнай трываласці, індэкс супраціўлення пластычнай дэфармацыі, аптычныя ўласцівасці, электрафізічныя ўласцівасці

Мэта даследавання: усталяваць узаемасувязь паміж фізіка-тэхналагічнымі ўмовамі фармавання (вар'іраванне кампанентнага складу мішэняў, рэжымаў нанясення, легіруючых кампанентаў) пакрыццяў TiAlN , TiAlCN , TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN , створаных метадам рэактыўнага магнетроннага распылення, і іх складам, асаблівасцямі структуры і фізіка-механічнымі ўласцівасцямі.

Метады даследавання: сканавальная электронная мікраскапія, энергадысперсійная рэнтгенаўская спектраскапія, атамна-сілавая мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, чатырохзондавы метады вымярэння ўдзельнага супраціўлення, спектрафатометрычны метады вымярэння спектраў адлюстравання, вымярэння мікрацвёрдасці, трыбамеханічныя выпрабаванні.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлены ўплыў вар'іравання кампанентнага складу мішэняў, рэжымаў нанясення, легавальных кампанентаў пры рэактыўным магнетронным распыленні нанаструктураваных пакрыццяў TiAlN , TiAlCN , TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN на іх структурныя асаблівасці і фізіка-механічныя ўласцівасці. Вызначаны аптымальныя суадносіны металічнай і неметалічнай кампаненты для фарміравання пакрыццяў TiAlCuN , TiAlCuCN , TiAlSiN , TiAlSiCN з аптымальнымі каэфіцыентамі сонечнага паглынання і эмісіі, найбольшай эфектыўнасцю фотатэрмічнага пераўтварэння, максімальнымі значэннямі цвёрдасці, найлепшай супраціўляльнасцю да пластычных дэфармацый і найменшым каэфіцыентам трэння.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: вынікі праведзенага даследавання могуць выкарыстоўвацца для стварэння звышцвёрдых зносаўстойлівых керамічных пакрыццяў, у якасці ахоўных тэрмарэгулюючых тонкаплёнкавых структур, у навукова-даследчых працах і адукацыйным працэсе.

РЕЗЮМЕ

Чижев Игорь Викторович

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, наноструктурированные покрытия, структурно-фазовое состояние, твердость, модуль Юнга, индекс ударной вязкости, индекс сопротивления пластической деформации, оптические свойства, электрофизические свойства

Цель исследования: установить взаимосвязь между физико-технологическими условиями формирования (варьирование компонентного состава мишеней, режимов нанесения, легирующих компонентов) покрытий TiAlN, TiAlCN, TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, создаваемых методом реактивного магнетронного распыления, и их составом, особенностями структуры и физико-механическими свойствами.

Методы исследования: сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, атомно-силовая микроскопия, рентгеноструктурный анализ, четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления, спектрофотометрический метод измерения спектров отражения, измерения микротвердости, трибомеханические испытания.

Полученные результаты и их новизна: установлено влияние варьирования компонентного состава мишеней, режимов нанесения, легирующих компонентов при реактивном магнетронном осаждении наноструктурированных покрытий TiAlN, TiAlCN, TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN на их структурные особенности и физико-механические свойства. Установлены оптимальные отношения металлической к неметаллической компоненте для формирования покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN с оптимальным коэффициентом солнечного поглощения и эмиссии, наибольшей эффективностью фототермического преобразования, наибольшим значением твердости, наилучшей сопротивляемостью к пластическим деформациям и наименьшим коэффициентом трения.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты проведенного исследования могут использоваться для создания сверхтвёрдых износостойких керамических покрытий, в качестве защитных терморегулирующих тонкоплёночных структур, в научно-исследовательских работах и образовательном процессе.

SUMMARY

Igor V. Chizhov

STRUCTURAL-PHASE STATES AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COATINGS TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN FOR SPACE TECHNOLOGY

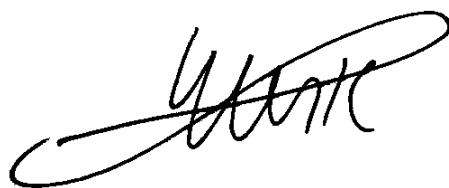
Keywords: reactive magnetron sputtering, nanostructured coatings, structural-phase state, hardness, Young's modulus, impact toughness index, plastic deformation resistance index, optical properties, electrophysical properties

Objectives: to establish the relationship between the physico-technological conditions of formation (variation in the target component composition, deposition modes, and doping components) of TiAlN, TiAlCN, TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, and TiAlSiCN coatings, created by reactive magnetron sputtering, and their composition, structural characteristics, and physical-mechanical properties.

Methods: scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, atomic force microscopy, X-ray structural analysis, four-point probe method for measuring specific resistivity, spectrophotometric method for measuring reflection spectra, microhardness measurements, and tribomechanical testing.

The results and their novelty: the influence of varying the target component composition, deposition modes, and doping components during reactive magnetron sputtering on the structural characteristics and physical-mechanical properties of TiAlN, TiAlCN, TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, and TiAlSiCN nanostructured coatings has been investigated. Optimal ratios of metal-to-nonmetal components were identified for forming TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, and TiAlSiCN coatings with optimal solar absorption and emission coefficients, maximum photo-thermal conversion efficiency, highest hardness, highest resistance to plastic deformation, and lowest friction coefficients.

Recommendation on the use and scope: the results of the conducted research can be used for the creation of superhard wear-resistant ceramic coatings, as protective thermoregulating thin-film structures, in scientific research and in the educational process.



Научное издание

ЧИЖОВ

Игорь Викторович

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОКРЫТИЙ TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN ДЛЯ
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Подписано в печать 27.03.2026.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,45. Тираж 60 экз. Заказ № 94.

ФТИ НАН Беларуси.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.

220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.