

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной
работе Физико-технического
института НАН Беларуси


И.П. Смягликов
«24» 04 2026 г.

ОТЗЫВ ОППОНИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки.

Диссертация посвящена изучению структурно-фазовых состояний, физических и механических свойств наноструктурированных покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, формируемых методом магнетронного распыления, установлению взаимосвязи между составом, особенностями структуры и свойствами покрытий, технологическими условиями их формирования (варьирование компонентного состава мишеней, режимов нанесения), что соответствует отрасли «физико-математические науки».

Область выполненных в диссертации исследований соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, утвержденному Приказом ВАК Республики Беларусь № 6 от 08.01.2024, в части раздела III. п.1 «Методы получения, измерения параметров и модификации материалов (физические и технические аспекты)», п. 2 «Элементный и фазовый состав, структура (строение) и физические свойства конденсированных сред (систем)».

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи.

Соискателем установлено влияние технологических условий формирования методом реактивного магнетронного распыления (варьирование компонентного состава мишеней, режимов нанесения, легирующих компонентов) на состав, структуру, физико-химические и механические свойства покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN. Изучен элементный состав покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, полученных распылением мишеней с различным

отношением титана и алюминия, с добавлением в состав мишени меди и кремния при варьировании напуска реактивных газов. Установлены особенности структурно-фазового состояния покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN, полученных магнетронным распылением, при варьировании состава мишеней и реактивного газа в вакуумной камере. Изучено влияние режимов нанесения, а также состава и структуры покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN на их оптические, терморегулирующие, электрофизические, механические и трибологические свойства.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая степень.

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).

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для создания износостойких защитных покрытий изделий машиностроения (металлообрабатывающий инструмент, детали узлов трения машин и механизмов и тд.), для космической техники (защита ответственных узлов и механизмов космических летательных аппаратов).

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

Диссертационная работа Чижова И.В. выполнена на высоком научном и экспериментальном уровне с использованием современного оборудования, методик анализа элементного, фазового состава, структуры, физических и механических свойств многокомпонентных покрытий, современных программных комплексов обработки экспериментальных данных. Воспроизводимость экспериментов и согласованность с литературными данными позволяют считать полученные результаты достоверными. Положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации 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).

На основании анализа содержания диссертационной работы, использованных соискателем методов исследования и интерпретации полученных результатов, а также публикаций соискателя можно сделать вывод о том, что научная квалификация Чижова И.В. соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук, на которую он претендует.

5. Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации.

Результаты диссертации были использованы при выполнении 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), задания 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 (№ госрегистрации 20220014).

Разработанные композиционные покрытия могут быть применены не только для дальнейшего развития фундаментальных исследований в области физики конденсированного состояния, но и для решения прикладных проблем в задачах машиностроения, космического материаловедения, а также для оптимизации технологии создания фототермических преобразователей солнечного излучения.

Замечания:

1. В тексте диссертационной работы отсутствуют ссылки на собственные публикации автора.

2. Применение термина «физико-механические» свойства некорректно, классические термины и определения включают физико-химические, механические свойства.

3. При изучении механических свойств покрытий было установлено, что коэффициент трения увеличивается с уменьшением шероховатости, желательно было бы привести объяснение данному эффекту(стр.159).

4. Утверждение об адгезионной прочности покрытий только по изучению фрактограмм является преждевременным.

5. В работе исследования по высокотемпературному окислению данных покрытий не проводились, однако соискатель относит их к разряду термостойких. Приведенная ссылка на результаты экспериментов других авторов для покрытий аналогичного состава, но сформированных другим методом, не достаточна (стр.162).

6. Установление в работе взаимосвязи не только элементного состава и структуры, но и фазового состава покрытий с их свойствами позволило бы расширить научные представления об управлении свойствами многокомпонентных покрытий, формируемых методами вакуумно-плазменного осаждения.

7. Не совсем утверждение соискателя о том, что 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 $TiAlCuCN$, $TiAlSiCN$, так как известны уже проведенные исследования в данной области.

8. В автореферате следовало бы привести таблицу с описанием образцов и режимов их осаждения (в диссертации такая присутствует), ее отсутствие затрудняет анализ полученных результатов.

9. В работе и автореферате присутствуют отдельные грамматические, технические ошибки и некорректные термины, например, «металлическое поведение», «скорость износа», «сухое трение», на рисунке 3.7 (СЭМ-микрофотографии поверхности (а, в, д) и скола (б, г, е)) перепутаны обозначения, индексы Миллера приведены без скобок.

Однако указанные замечания не снижают научной, практической и социальной значимости работы и не касаются положений, выносимых на защиту, и выводов.

Заключение

Диссертация Чижова И.В. является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, соответствующей требованиям ВАК Республики Беларусь к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния за:

– 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 $v = 0,31\text{--}0,71$ нм/с при добавлении ацетилена C_2H_2 к реактивной смеси в пропорции $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2 = 0,32\text{--}0,76$ и обеспечивающие формирование карбонитридных наноструктур TiAlCuCN , TiAlSiCN с требуемым соотношением компонент.

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

– 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 системы TiAlN, что позволит предотвращать локальное скопление заряда на поверхности малых космических аппаратов и повысит надёжность и долговечность их эксплуатации;

– 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 изнашивания W на 82,9–97,6 % относительно покрытий TiAlCuN, TiAlSiN,

что в совокупности позволило рекомендовать изученные покрытия в качестве защитных слоёв для изделий машиностроения (металлообрабатывающий инструмент, детали узлов трения машин и механизмов и тд.), для космической техники (защита ответственных узлов и механизмов космических летательных аппаратов), а также внедрить результаты исследования в образовательный процесс для подготовки студентов на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ.

Доклад соискателя и отзыв эксперта, назначенного приказом № 79 от 14.04.2026, заслушаны и обсуждены на заседании научного собрания ФТИ НАН Беларуси (протокол № 2 от 24.04.2026).

Присутствовали члены научного собрания – 16 (из них 7 докторов наук, 9 кандидатов наук).

Результаты голосования: «за» – 16, «против» – нет «воздержались» – нет.

Председатель собрания,

заведующий отделом,

д. т. н., профессор

Секретарь,

к.т.н.

Эксперт, зав. лабораторией

вакуумно-плазменных покрытий,

к. т. н., доцент




А.Т. Волочко

О.И.Посылкина



С.Д. Латушкина