

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** 24.2.327.04 (Д 212.125.15)

**Соискатель:** Павлов Юрий Сергеевич

**Тема диссертации:** «Исследование состава, структуры и свойств магнетронных твердосмазочных покрытий TiN-Pb» выполнена на кафедре «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Специальность:** 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:** на заседании 22 декабря 2022 года, протокол № 190/22, диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, по научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению она удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, и принял решение присудить Павлову Юрию Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук

**Присутствовали:**

Мамонов А.М. – председатель диссертационного совета;

Скворцова С.В. – ученый секретарь диссертационного совета;

Члены диссертационного совета:

Абраимов Н.В., Бабаевский П.Г., Бецофен С.Я., Бухаров С.В., Егорова Ю.Б., Коллеров М.Ю., Костина М.В., Крит Б.Л., Лозован А.А., Моисеев В.С., Никитина Е.В., Серов М.М., Слепцов В.В., Терентьева В.С., Шефтель Е.Н., Шляпин С.Д., Шляпин А.Д., Эпельфельд А.В.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

С.В. Скворцова

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**  
**ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.04 (Д.212.125.15 ),**  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 22 декабря 2022 года № 190/22

О присуждении Павлову Юрию Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование состава, структуры и свойств магнетронных твердосмазочных покрытий TiN-Pb» по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы» принята к защите 13 октября 2022 г., протокол № 176/22 диссертационным советом 24.2.327.04 (Д 212.125.15), созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, приказ о создании совета № 129/нк от 22.02.2017 г. и приказ о внесении изменений в состав совета № 692/нк от 18.11.2020 г.

Соискатель Павлов Юрий Сергеевич, 02 августа 1993 года рождения, в 2017 г. окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», в 2021 г. окончил очную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», работает заведующим лабораторией в федеральном государственном бюджетном образовательном

учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, Лозован Александр Александрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов», профессор.

Официальные оппоненты:

Овчинников Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский политехнический университет", кафедра «Материаловедение», заведующий кафедрой.

Смирнова Анастасия Николаевна, кандидат технических наук, Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий», начальник отдела

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Костромской государственный университет», г. Кострома, в своем положительном отзыве, подписанном Кусмановым С.А., директором института физико-математических и естественных наук КГУ, доктором технических наук, доцентом, и

утвержденном Наумовым А.Р., исполняющим обязанности ректора, кандидатом химических наук, доцентом, указала что диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 12 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Лозован, А. А. Структура и свойства композитных TiN-Pb покрытий, напыленных на сплав VT6 магнетронным распылением постоянного тока / А. А. Лозован, С.Я. Бецофен, М.А. Ляховецкий, Ю. С. Павлов, И. А. Грушин, Е. П. Кубатина, И. А. Николаев // Известия Вузов. Цветная металлургия. – 2021. – Т. 27. - № 4. - С. 70-77.

Lozovan, A.A. Structure and properties of TiN–Pb composite coatings deposited on VT6 alloy magnetron sputtering DC / A.A. Lozovan, S.Y. Betsofen, M.A. Lyakhovetskiy, Y.S. Pavlov, I.A. Grushin, E.P. Kubatina, I.A. Nikolaev // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021. – Vol. 62. – № 5. – P. 554-560.

2. Лозован, А. А. Структура и свойства магнетронных TiN-Pb- покрытий на сплавах VT6 и 12X18H10T/ А.А. Лозован, С.Я. Бецофен, Ю. С. Павлов, И.А.Грушин, Е.П. Кубатина // Металлы. – 2021. -№5. – С. 94-101.

Lozovan, A.A. Structure and properties of TiN–Pb magnetron coatings on VT6 and 12Kh18N10T alloys / A.A. Lozovan, S.Y. Betsofen, Y.S. Pavlov, I.A. Grushin, E.P. Kubatina // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – Vol. 2021. – №9. – P. 1121-1127.

3. Lozovan, A. A. Study of the ion assisted sputtering process parameters influence on the structure and morphology of TiPb coatings // A. A. Lozovan, S. Y. Betsofen, M. A. Lyakhovetskiy, L. N. Lesnevskiy, A. V. Bepalov, I. A. Nikolaev,

Yu.S. Pavlov, S. S. Aleksandrova // RSMC 2019 IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 1396 (2019) 012029.

4. Lozovan, A. A. Study of the influence of the substrate material on the phase composition and thickness of Ti-Pb coatings deposited by a magnetron / A. A. Lozovan, S. Y. Betsofen, M. A. Lyakhovetskiy, Yu.S. Pavlov, I. A. Grushin, M. A. Lebedev, T. S. Sukhova, E. P. Kubatina // RSMC 2020 IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 1713 (2020) 012027.

5. Lyakhovetskiy, M. A. Tribological properties of solid lubricating coatings of the TiN-Pb system at various Pb content / M. A. Lyakhovetskiy, A. A. Lozovan, L. N. Lesnevskiy, I. A. Nikolaev, Yu. S. Pavlov// RSMC 2020 IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 1713 (2020) 012029.

6. Lozovan, A. A. Reactive magnetron sputtering of TiN-Pb coatings using two metal targets / A. A. Lozovan, M. A. Lyakhovetskiy, Yu. S. Pavlov, D. K. Kostrin // 27th International Conference on Vacuum Technique and Technology IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 1799 (2021) 012019.

7. Lozovan, A. A. Influence of magnetron spraying parameters on the structure of TiN-Pb coatings / A. A. Lozovan, S. Y. Betsofen, M. A. Lyakhovetskiy, Yu. S. Pavlov, I. A. Grushin, I. A. Nikolaev // 15th International Conference on Films and Coatings (ICFC 2021) IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 1954 (2021) 012029.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных Павловым Ю.С. работах.

На автореферат поступило 9 отзывов: от ФГУП «Всероссийского научно-исследовательского института автоматики имени Н.Л. Духова» за подписью главного специалиста, к.т.н. Щитова Н.Н.; от ФГБУ «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова» Российской академии наук за подписью заведующего лабораторией физикохимии и технологии покрытий, д.т.н., г.н.с. Калиты В.И.; от ФГБУН «Института проблем машиноведения» Российской академии наук за подписью главного научного сотрудника лаборатории модифицирования поверхностей материалов, д.т.н. Кузнецова В.Г.; от ФГБУН

«Института сильноточной электроники» Сибирского отделения Российской академии наук за подписью главного научного сотрудника лаборатории плазменной эмиссионной электроники, д.т.н., профессора Коваля Н.Н.; от ФГБОУ ВО «Костромского государственного университета» за подписью к.т.н., доцента Мухачевой Т.Л.; от АО «Композит» за подписью начальника отделения Металлических композиционных материалов и спецпокрытий, к.т.н. Ленковца А.С.; от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» за подписью профессора кафедры ФЭТ, д.т.н, профессора Шаповалова В.И.; от ФГБОУ ВО «Рыбинского государственного авиационного технического университета П.А. Соловьева» за подписью заведующего кафедрой материаловедения, литья и сварки, д.т.н., профессора Шатульского А.А.; от ФГБОУ ВО «Уфимского университета науки и технологий» за подписью профессора кафедры «Технология машиностроения» д.т.н., профессора Смыслова А.М.

Все отзывы положительные, в них отражена научная новизна, актуальность и практическая значимость работы, некоторые отзывы содержат замечания, например:

- Из текста автореферата не ясно является ли причиной пониженной твердости и износостойкости покрытий с повышенной интенсивностью текстуры (111) сама по себе текстура или другие структурные эффекты, сопровождающие это изменение текстуры.
- В автореферате описано снижение износа стальных поверхностей с ТСП TiN-Pb. Дано значение коэффициента трения покрытия на стали и количество циклов до его разрушения. Но из автореферата неясно, как покрытие будет работать на подложке из титана VT6;
- К сожалению, в автореферате автор не указывает температуру подложки, при которой происходил процесс формирования на ней функциональных слоёв. Особенно это важно при анализе влияния азотирования подложки

на свойства создаваемых слоёв, т.к. температура и время азотирования определяют формирование и свойства таких диффузионных слоёв.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области данной диссертационной работы, подтвержденной наличием у них соответствующих публикаций, а также их согласием.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложен подход к созданию новых твердосмазочных покрытий в рамках концепции «твевдая матрица – мягкий металл» путем управления процессом их формирования распылением катодов отдельных магнетронов при оптимальных параметрах разряда и ионном ассистировании напыления;

доказана перспективность использования концепции «твевдая матрица – мягкий металл» для создания твердосмазочных покрытий с повышенной износостойкостью.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказан эффект упрочнения титановой подложки низкотемпературным ионным азотированием при нанесении покрытий TiN-Pb, происходящим по механизму захвата азота подложкой, а также имплантацией азота как в виде атомов отдачи при напылении свинца, так и при ионном ассистировании.

Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования состава, структуры и механических свойств материалов, в том числе: экспериментальные методы электронно-микроскопического, энерго-дисперсионного и рентгеноструктурного анализа, измерения твердости, механических и трибологических испытаний;

изложены результаты исследований влияния соотношения потоков аргона и азота при напылении на величины микротвердости и износостойкости многослойных покрытий TiN-Pb;

изучено влияние условий магнетронного напыления на формирование фазового состава, текстуры и морфологии поверхности, а также микротвердость и износостойкость композитных TiN-Pb покрытий на



титановом сплаве ВТ6 и коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Показано, что фазовый состав покрытий определяется током на свинцовом катоде и отношением потоков аргона и азота.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны технологические режимы формирования многослойных твердосмазочных покрытий TiN-Pb, перспективных для применения в космических аппаратах и плазменной очистки подложек и внутрикамерных поверхностей повышенной эффективности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном оборудовании с применением современных методов исследования, показана воспроизводимость результатов измерения механических и трибологических свойств;

идея базируется на анализе практики и обобщении передового опыта разработки композиционных твердосмазочных покрытий TiN-Pb с повышенными характеристиками.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном и активном участии в формировании цели и задач исследования, в модернизации экспериментальной установки, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке рекомендаций и выводов по диссертации, в подготовке основных публикаций по теме диссертации, личном участии автора в апробации результатов исследования.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 7 слайд, таблица 1. Для расхода 2,0 сссм проиллюстрируйте (прокомментируйте) характеристики получаемых покрытий, потому что нет функции отклика в этой таблице. Хотелось бы охарактеризовать покрытия со значение расхода азота 2,0 сссм.

- Большая разница атомных масс титана и свинца приводит к разным условиям напыления. Атомы титана будут существенно термализоваться при



условиях Вашего эксперимента (данной дистанции мишень-подложка). На какой дистанции будут термализованы атомы свинца.

- В заключении не указано при каких режимах получено максимальное значение микротвердости при минимальном износе покрытия?

Соискатель Павлов Ю.С. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- Эти покрытия TiN-Pb напылялись при одинаковом расходе азота 2 сссм, но при разном токе свинца  $I_{Pb} = 0,1$  А и 0,2 А и при использовании ионного ассистирования и без него. Покрытие 2 табл.1, нанесенное с ионным ассистированием, характеризуется наличием интенсивной линии (111) TiN, единственной линии PbO низкой интенсивности и низким содержанием Pb. Покрытие 3, нанесенное также с ионным ассистированием, но при токе  $I_{Pb} = 0,2$  А характеризуются повышенным содержанием Pb по сравнению с покрытием 2 и отсутствием линий, принадлежащих TiN. Покрытие 5, нанесенное без ионного ассистирования также при токе  $I_{Pb} = 0,2$  А содержит больше Pb по сравнению с покрытием 3, так как было сформировано в отсутствие распыления ионной бомбардировкой и также не содержит линий TiN. Однако химический состав этих покрытий показывает содержание Ti и N в значительном количестве, не меньшим, чем в покрытиях, нанесенных при  $I_{Pb} = 0,1$  А. По-видимому, при повышенных значениях  $I_{Pb}$  происходит аморфизация TiN за счет изменения механизма формирования нитрида так, как это происходит при добавлении атомов Si в состав нитрида титана.

- Термализация свинца в нашем случае происходит при величине дистанции мишень магнетрона-подложка более 250 мм, что приводит к баллистическому напылению свинца в отличие от титана, формирующего диффузный поток осаждаемых атомов вследствие их эффективного рассеяния на близких по массе атомах аргона.

- Подобное сочетание свойств получено при отношении потоков аргона и азота от 1,3 до 2,1 при токе  $I_{Pb} = 0,1$  А и  $I_{Ti} = 3,5$  А. Было обнаружено сильное различие твердости покрытий, нанесенных на ВТ6 и 12Х18Н10Т при одинаковых режимах. При том, что фазовый состав покрытий аналогичен, следовательно, механические свойства покрытий также не должны отличаться.

Этот эффект объясняется влиянием на показатели микротвердости тонкого покрытия упрочнения титановой подложки в результате процесса азотирования, о чем свидетельствуют обнаруженные изменения периодов решетки подложки. В последнем столбце табл.4 приведены значения периодов «с» ГУ решетки материала подложки. Эти периоды увеличены наиболее сильно именно для тех покрытий, которые характеризуются максимальным отличием от микротвердости покрытий, нанесенных при том же режиме, но на сталь 12Х18Н10Т. Эффект азотирования подложки для обр. 1–7 может происходить путем захвата газа подложкой, а также имплантацией атомов отдачи азота при их бомбардировке на подложке распыленными тяжелыми атомами свинца, имеющими среднюю энергию около 30 эВ, а для образца 8 – прямой имплантацией азота с  $E \geq 1$  кэВ.

На заседании 22 декабря 2022 года диссертационный совет принял решение за новые научно-обоснованные технические и технологические решения по созданию и управлению химическим и фазовым составом, структурой и триботехническими свойствами твердосмазочных покрытий TiN-Pb, имеющие существенное значение для развития страны, присудить Павлову Ю.С. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы», участвовавших в заседании; из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель  
диссертационного совета



Мамонов Андрей Михайлович

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Скворцова Светлана Владимировна

22 декабря 2022 года

