УТВЕРЖДАЮ.

Зам. директора по НР
ИФПМ СО РАН
д.ф.-м.н. Шилько Е.В.

«14» ноября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИФПМ СО РАН)

Диссертация «Структура и свойства многокомпонентных ионно-плазменных покрытий, нанесенных на поверхность медно-бериллиевого сплава вакуумно-дуговым методом» по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) выполнена в лаборатории физики упрочнения поверхности (ЛФУП) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН).

Семенчук Наталья Валерьевна, 1997 года рождения, в 2020 году с отличием окончила магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

В период с 01.10.2020 г. по 30.09.2024 г. Семенчук Н.В. обучалась в очной аспирантуре ФГБУН ИФПМ СО РАН (диплом 107024 №1466842 от 12 июля 2024 года) по направлению подготовки 22.06.01 «Технологии материалов». В период обучения в аспирантуре сдала кандидатские экзамены по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) и получила следующие оценки:

История и философия науки –24.06.2021 г., хорошо

Иностранный язык (английский) – 30.06.2022 г., отлично

Специальная дисциплина - материаловедение – 20.06.2023 г., отлично.

С октября 2018 г. и по октябрь 2021 г. Семенчук Н.В. работала в лаборатории физики упрочнения поверхности в должности инженера. В октябре 2021 года была

переведена в лабораторию структурного дизайна и перспективных материалов на должность младшего научного сотрудника. В марте 2024 г. переведена в лабораторию физики упрочнения поверхности на должность младшего научного сотрудника, где и по настоящее время работает.

Научный руководитель (научный консультант) – Колубаев Александр Викторович д.ф-м.н., профессор, основное место работы: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), главный научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности (скончался 22.08.2024 г.).

По итогам обсуждения диссертационной работы Семенчук Н.В. принято следующее

Актуальность темы диссертации

Диссертация Семенчук Н.В. посвящена получению ионно-плазменных покрытий на поверхности медно-бериллиевого сплава БрБ2, исследованию их структуры и трибологических свойств, в том числе в условиях пропускания электрического тока большой плотности. Несмотря на достигнутый значительный прогресс в разработке методик и технологий формирования функциональных покрытий с различными свойствами, проблема их совместимости с материалом основы остаётся актуальной. Особенно малоизучены вопросы возможности нанесения ионно-плазменных покрытий на пластичные материалы, обеспечивающие получение бездефектной структуры «покрытие – металл» с высокими эксплуатационными свойствами. На сегодняшний день международная и зарубежная литература ограничивает число публикаций, посвящённых характеристикам и технологиям нанесения твёрдых износостойких покрытий на пластичные изделия, такие как медь и её сплавы. Особенно мало внимания уделяется механизму деградации этих покрытий в экстремальных условиях. Среди медных сплавов особый интерес вызывает бериллиевая бронза (БрБ2), используемая для производства прецизионных деталей в аэрокосмической отрасли и электрических контактов для высокоточных приборов. В связи с этим технология модификации поверхностного слоя бронзы для повышения ее стойкости к износу и коррозии представляют собой чрезвычайно актуальную задачу.

В диссертационной работе показано, что многослойные покрытия CrN/TiN обладают высокой твердостью и хорошей адгезией к медно-бериллиевому сплаву, что обеспечило хорошую износостойкость покрытий при трении скольжения без признаков заметного износа при нагрузке до 5 Н. При испытании покрытий TiN и CrN с подслоем Cu-Ti, при наложении электрического тока плотностью более 100 А/см^2 было показано, что контактная электропроводность покрытия на основе нитрида титана более чем в три раза выше, чем для покрытия из нитрида хрома и имеет

удовлетворительную величину для применения в качестве контактных колец в токосъемных устройствах.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Семенчук Н.В. выполнена на современном научном уровне и является научно-квалификационной работой, которая посвящена исследованию физико-механических и трибологических свойств бериллиевой бронзы с твердыми многокомпонентными покрытиями, полученными вакуумно-дуговым методом. Результат диссертационной работы заключается в выработке рекомендаций для повышения износостойкости бериллиевой бронзы, путем нанесения твердых покрытий оптимального состава и структуры для работы в узлах трения при разных параметрах внешних воздействий.

Результаты, полученные соискателем впервые

1. Экспериментально установлено, что, несмотря на высокую твердость состаренной бериллиевой бронзы БрБ2, ее износостойкость ниже, чем у закаленной со структурой твердого раствора, как при наложении электрического тока, так и без него. Причиной этого служит деформационное упрочнение поверхностного слоя закаленного сплава и окисление в результате фрикционного нагрева и электрической эрозии, что приводит к постепенному изнашиванию путем отделения ультрадисперсных фрагментов окисленного слоя. Снижение стойкости к износу состаренного сплава обусловлено сменой механизма изнашивания с коррозионно-механического износа на комбинированный (коррозионно-механический и адгезионный), при котором преобладает адгезионный износ.

2. Показано, что в условиях сухого трения скольжения в композиционном и градиентном покрытиях Cu-Ti на сплаве БрБ2 образуются трещины в результате несовместности деформаций в материале основы и твердого слоя с последующим разрушением покрытий по механизму адгезионного и коррозионно-механического изнашивания.

3. Многослойные покрытия CrN/TiN, имеющие выраженную периодичность нанослоев с четкими границами раздела между нанесенными слоями, обладают хорошей адгезией к подложке, не разрушаются и не отслаиваются даже при пластической деформации подложки на глубину, превышающую толщину покрытия.

4. При испытании бериллиевой бронзы и покрытий TiN и CrN с подслоем Cu-Ti в паре с твердым сплавом при наложении электрического тока плотностью более 100 А/см^2 было показано, что контактная электропроводность наиболее высокая при трении образца из бронзы, тогда как наличие покрытия снижает электропроводность. При этом контактная электропроводность «TiN-контртело» вполне удовлетворительная при высокой плотности тока, что открывает перспективы для повышения износостойкости скользящих электрических контактов из бронзы.

Теоретическая значимость.

Предлагаемая тема получения многокомпонентных покрытий на пластичные сплавы является недостаточно изученной, а эффективность градиентного состава покрытий, обеспечивающих высокую износостойкость, нуждается в дальнейшем изучении. До сегодняшнего дня в научной литературе не представлены комплексные исследования, позволяющие рекомендовать оптимальную толщину, состав и комбинацию свойств покрытий, полученных ионно-плазменными методами, для работы в условиях трения. Теоретически значимым в настоящем исследовании является использование идеи неоднородности структуры покрытий, получаемых путем создания разных по фазовому составу слоев с целью погашения упругих возбуждений, возникающих в процессе трения. Комбинация градиентной пленки Cu-Me, полученной методом вакуумно-дугового распыления, и последующего процесса плазменного азотирования, используется для модификации поверхностного слоя сплава БрБ2.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в обосновании режимов нанесения ионно-плазменных покрытий на поверхность бериллиевой бронзы, обеспечивающих получение оптимальной толщины и состава многослойных и градиентных функциональных покрытий для работы в условиях трения скольжения при разных нагрузках. Полученные износостойкие покрытия обеспечивают минимизацию нормального механохимического износа, а также обладают высокостабильными свойствами, мало изменяющимися в сложных условиях нагружения. Результаты исследований структуры, твердости и трибологических испытаний позволяют рекомендовать использование ионно-плазменной обработки для упрочнения изделий триботехнического назначения из пластичных и твердых сплавов (Акт испытаний).

Достоверность результатов и обоснованность выводов, полученных в работе, обеспечивается применением современных методов экспериментальных исследований с использованием современного сертифицированного оборудования; а также согласованностью результатов с данными, представленными в литературных источниках.

Личный вклад автора состоит в совместной с научным руководителем постановке цели и задач исследования, в подготовке образцов для проведения структурных и триботехнических исследований, проведении испытаний и анализе полученных результатов, написании статей по теме диссертации, формулировке основных положений и выводов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях и научных форумах, таких, как: Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (Томск

2019 г., 2020 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» (Новосибирск, 2020 г.); VIII Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации.» (Екатеринбург, 2021 г.); Международный научный форум «Наука и инновации – современные концепции» (Москва, 2022 г.); Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению» (Москва, 2020 г., 2022 г.); Международная конференция «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения», (Томск 2022г., 2023 г., 2024 г.).

Основное содержание работы изложено в 5 работах, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий из списка ВАК, 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

1. Колубаев А.В, Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., **Терюкалова Н.В.,** Белый А.В. Многофазные покрытия Cu-Ti, полученные вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом на медно-бериллиевом сплаве С17200 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22. - № 4. – С. 137-150.
2. A. V. Kolubaeva, O. V. Sizova, **N. V. Teryukalova**, and Yu. A. Denisova. Wear of Quenched and Aged Cu–Be Alloy at Current Transfer // Journal of Friction and Wear, 2020, Vol. 41, No. 6, pp. 559–564.
3. A. V. Kolubaev, O. V. Sizova, Yu. A. Denisova, A. A. Leonov, **N. V. Teryukalova**, O. S. Novitskaya, and A. V. Byeli. Structure and Properties of CrN/TiN Multilayer Coatings Produced by Cathodic Arc Plasma Deposition on Copper and Beryllium-Copper Alloy // Physical Mesomechanics, 2022, Vol. 25(4), pp. 306-317.
4. Sizova O. V., Kolubaev A. V., Filippov A. V., **Teryukalova N. V.,** Denisova, Y. A. (2019). The effect of microstructure on a beryllium bronze wear. 2019. P. 020338.
5. **Semenchuk N. V**., N. V.; Kolubaev, A. V.; Sizova, O. V.; Denisova, Yu. A.; Leonov, A. A. Structure and Properties of Multilayer CrN/TiN Coatings Obtained by Vacuum-Arc Plasma-Assisted Deposition on Copper and Beryllium Bronze // Russ. Phys. J. 2023. Vol. 66, № 10. P. 1077–1086.

Научная специальность диссертации

Анализ структуры и содержания диссертационный работы Семенчук Н.В. «Структура и свойства многокомпонентных ионно-плазменных покрытий, нанесенных на поверхность медно-бериллиевого сплава вакуумно-дуговым методом» показал, что по своей структуре, сформулированным целям, задачам, методам исследования и научной новизне соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК и пунктам 5 и 11 паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Заключение принято на заседании экспертного научного семинара ИФПМ СО РАН. Присутствовало на заседании 22 человека, в том числе 10 докторов и 4 кандидата наук. Результаты голосования: «за» – 22, «против» – нет, «воздержалось» – 0; протокол № 128 от 26.09.2024 г.

Председатель семинара:
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе,
заведующая лабораторией физической
мезомеханики и неразрушающих методов
контроля ИФПМ СО РАН — Буякова С.П.

Секретарь семинара:
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
лаборатории физики упрочнения поверхности
ИФПМ СО РАН — Новицкая О.С.