ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Семенчук Натальи Валерьевны «Структура и свойства многокомпонентных ионно-плазменных покрытий, нанесенных на поверхность медно-бериллиевого сплава вакуумно-дуговым методом», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы

Долговечность конструкционных материалов зависит от износостойкости, коррозионной и электроэрозионной стойкости. Эти свойства определяются контактными взаимодействиями сопряжённых поверхностей. Существенную роль в достижении долговечности играют процессы переноса вещества в зоне контактирования поверхностей: электрохимические и механохимические реакции, а также взаимодействие с окружающей средой. Перспективными методами модификации поверхности металлов и сплавов в настоящее время являются методы нанесения покрытий, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, которые позволяют получать материалы с высокой твёрдостью, вязкостью, теплостойкостью и низким коэффициентом трения.

В настоящее время в методах и технологиях создания функциональных покрытий с разными свойствами был достигнут большой прогресс, однако проблема совместимости функциональных покрытий с материалом подложки остаётся актуальной. Малоизученными являются вопросы нанесения ионно-плазменных покрытий на пластичные металлы, в том числе на медь и её сплавы, а также механизмы деградации таких покрытий в условиях экстремальных воздействий. Бериллиевая бронза (БрБ2) вызывает повышенный интерес среди медных сплавов. Её используют для производства прецизионных деталей в аэрокосмической отрасли, а также при изготовлении электронных и электрических компонентов, электрических контактов для высокоточных приборов и прочих изделий. Таким образом, диссертационная работа Семенчук Н.В., посвященная исследованию ионно-плазменных покрытий, осаждаемых на поверхность медно-бериллиевого сплава БрБ2, несомненно является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с практической.

Краткий анализ содержания работы

Диссертационная работа Семенчук Натальи Валерьевны состоит из введения, семи разделов, выводов, списка литературы, включающего 200 наименований. Всего 142 страницы, 67 рисунков, 15 таблиц и 1 приложение.

Во введении приведены актуальность, степень разработанности темы диссертации, формулируются цель и задачи диссертационной работы, описываются

ИФПМ СО РАН
«___» 06 ФЕВ 2025 201__ г.
вх. № 060225/2
индекс

методология и использованные методы исследований, приводится ее теоретическая и практическая значимость, достоверность результатов, научная новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту, отражается личный вклад автора.

В первой главе автором выполнен литературный обзор по тематике работы. Проанализированы структура, свойства, применение и трибологическое поведение бериллиевой бронзы марки БрБ2. Рассмотрены способы увеличения износостойкости медно-бериллиевых сплавов за счёт осаждения покрытий. На основе анализа научной литературы были определены цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава диссертационной работы посвящена материалам и методам исследования. Приводится исчерпывающая информация об исследуемом материале, используемом оборудовании, параметрах осаждения покрытий и методиках проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе описаны результаты исследований структуры бериллиевой бронзы до и после трибологических испытаний. Показано, как меняется структура поверхностного слоя при трении с наложением электрического тока и без него. Также проведён анализ частиц износа и механизма изнашивания бериллиевой бронзы в зависимости от её структурного состояния. Было установлено, что в условиях токосъёма и без него закалённая бериллиевая бронза изнашивается по окислительно-механическому механизму, а состаренная — преимущественно по адгезионному.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию интерметаллических покрытий на основе меди и титана, полученных на поверхности бериллиевой бронзы. В зависимости от условий осаждения были получены композиционное и градиентное Cu-Ti покрытия. Были проведены: структурно-фазовый анализ покрытий, измерение микротвердости полученных покрытий на подложке из бериллиевой бронзы, скретч-тестирование и триботехнические испытания без наложения электрического тока. На основании проведенных исследований было установлено, что сформированные покрытия, нанесенные на бериллиевую бронзу, имеют низкое значение износостойкости.

В пятой главе приведены результаты исследования структуры и свойств однослойного TiN и многослойных CrN/TiN покрытий, осажденных на поверхность бериллиевой бронзы. Показано, что многослойные покрытия CrN/TiN имеют ярко выраженную периодичность мультислоев с четкими границами раздела между нанесенными слоями, а однослойное покрытие TiN имеет столбчатую структуру. В результате трибологических испытаний было установлено, что многослойные и однослойное покрытия на сплаве БрБ2 изнашивались по механизму микроабразивного трения в паре с оксидом алюминия.

Шестая глава посвящена изучению ионно-плазменных покрытий TiN и CrN с подслоем из меди и титана, нанесенных на бериллиевую бронзу. В данной главе обсуждаются результаты трибологических испытаний при скольжении с

электрическим током и без него. Также представлены результаты структурно-фазового анализа, измерения микротвердости покрытий на бронзовой подложке и их адгезионная прочность. Показано, что наложение электрического тока с плотностью более 100 А/см^2 приводит к повышению износа бериллиевой бронзы с покрытиями относительно трения без наложения электрического тока. Установлено, что при трении с токосъемом и без него бронза БрБ2 с покрытиями TiN и CrN на подслое Cu-Ti изнашивается по окислительно-механическому механизму.

В седьмой главе описана возможность практического применения исследуемых покрытий для упрочнения поверхностей деталей токосъемных колец, изготовленных из сплава БрБ2. Показано, что наиболее перспективным покрытием для упрочнения поверхности деталей, изготовленных из бериллиевой бронзы, работающих в условиях трения с пропусканием электрического тока, является покрытие на основе TiN с подслоем Cu-Ti.

В выводах коротко изложены основные результаты работы.

Научная новизна

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 дисперсных фрагментов окисленного слоя. Снижение стойкости к износу состаренного сплава обусловлено сменой механизма изнашивания с окислительно-механического износа на комбинированный (окислительно-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 окислительно-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.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов Исследования

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается применением современных стандартизированных методов и применением современного сертифицированного оборудования; а также обоснованностью и согласованностью результатов с данными, представленными в литературных источниках. Основные результаты диссертации были опубликованы в 5 работах, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий из списка ВАК, 3 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Результаты также обсуждены на всероссийских и международных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость

Научная значимость результатов, представленных в диссертации, состоит в углублении знаний о создании многокомпонентных твёрдых покрытий на поверхности пластичных сплавов. До настоящего момента в научных публикациях не было комплексных исследований, которые позволили бы определить оптимальную толщину, состав и сочетание свойств покрытий, полученных ионно-плазменными методами, для работы в условиях трения. В этом исследовании теоретически значимой является идея неоднородно-периодической многослойной структуры покрытий. Она заключается в создании слоёв с разным фазовым составом, чтобы погасить упругие колебания, возникающие при трении. Для модификации поверхностного слоя сплава БрБ2 используется комбинация градиентной плёнки Cu-Me, полученной методом вакуумно-дугового распыления, и последующего плазменного азотирования.

Практическая значимость работы заключается в обосновании режимов и выдаче рекомендаций для модифицирования поверхности меди и бериллиевой бронзы, с целью получения функциональных покрытий для работы в условиях трения. 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 (представлен акт испытаний).

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат диссертации полностью соответствует и отражает основное содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

1. В таблице 2.2 указаны параметры осаждения покрытий на БрБ2. Во всех случаях применялся потенциал смещения, который может являться причиной возникновения текстуры в покрытиях. Проводилось ли исследование влияния потенциала смещения на текстуру? Учитывалось ли это при анализе структуры сформированных покрытий?
2. В разделе 3.1 представлена микроструктура БрБ2 в состоянии поставки, после закалки и старения. Однако, не приведены данные о фазовом составе и параметрах структуры. Были ли получены указанные данные?
3. В таблицах 3.4, 4.2 и тексте диссертации указана точность определения элементов, которая недостижима методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.
4. Наличие титана в подложке вблизи границы «подложка-покрытие» в тексте работы объясняется наличием твердого раствора титана в меде (рисунок 4.2). Однако, ничего не сказано про размер области элементного анализа. Наиболее вероятно, что область анализа частично захватывает покрытие.
5. В таблице 5.1 указаны параметры решеток многослойных покрытий. На какую глубину проникает рентгеновское излучение в данном случае? Сколько слоев анализируется?

Заключение

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы. В целом работа Семенчук Натальи Валерьевны является актуальной, содержит новые научные результаты и представляет интерес для практического применения. Достоверность основных выводов работы и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений и достигается за счет грамотно проведенного эксперимента, анализа полученных результатов, большого объема данных, а также апробации на российских и международных конференциях. Основные результаты работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, и в статьях в журналах, входящих в системы цитирования Scopus и Web of Science.

Диссертационная работа Семенчук Н.В. «Структура и свойства многокомпонентных ионно-плазменных покрытий, нанесенных на поверхность медно-бериллиевого сплава вакуумно-дуговым методом», является завершенной научно-квалификационной работой. и соответствует паспорту научной

специальности 2.6.17. Материаловедение пункту 5) «Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды» и пункту 11) «Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством» паспорта. На основании изложенного считаю, Семенчук Наталья Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Кандидат технических наук (специальность 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий), научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и обеспечения безопасности водородных энергосистем Инженерной школы ядерных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Сыртанов Максим Сергеевич
06.02.2025

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
тел.: +7 (3822) 701777 (доб. 1542)
e-mail: mss12@tpu.ru

Подпись Сыртанова М.С. заверяю
И.о. Ученого секретаря ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Новикова Валерия Дмитриевна
06.02.2025