

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСМАН

профессор, член-корр. РАН

М.И. Алымов

«август» 2022 г.



Отзыв ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук на диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение Сергеевнина Виктора Сергеевича, выполненную на тему: «Разработка наноструктурных износостойких покрытий Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N, адаптируемых к меняющимся условиям трения»

Актуальность темы диссертации

Научная проблема повышения износостойкости деталей пар трения на сегодняшний день является актуальной. Ее актуальность обосновывается значительными энергетическими и экономическими издержками, вызываемыми изнашиванием компонентов механических систем. В данном направлении ведется большое количество исследований по всему миру. Одним из наиболее распространенных методов повышения износостойкости является применение защитных покрытий. В то же время их разработка затруднена из-за того, что износ является многопараметрической величиной, зависящей от значительного количества факторов, таких как параметры окружающей среды, вид и величина прикладываемой внешней нагрузки и т.д. В своей работе Сергеевнин В.С. решает поставленную проблему путем создания нового класса износостойких покрытий, характеризующихся адаптивными свойствами в меняющихся условиях трения, определяющих расширенную область применения. Параметры структуры и состава разрабатываемых материалов подобраны таким образом, чтобы наделять покрытия высокой твердостью и вязкостью разрушения, а также высокими трибологическими характеристиками и стойкостью при работе в агрессивных средах. Адаптивность материалов заключается в наличии функционального отклика на внешнее воздействие в виде образования слоя твердой смазки MoO_3 на рабочих поверхностях при нагреве во время трения и снижения за счет этого коэффициента трения и износа покрытий.

Научная новизна диссертационной работы

Диссертационная работа Сергеевнина В.С. содержит новые ценные научные результаты, в частности: 1) описаны закономерности структуро- и фазообразования при формировании покрытий в системах Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N методом ионно-плазменного вакуумно-дугового осаждения, а также влияния параметров структуры на их функциональные свойства; 2) показан эффект релаксации макронапряженного состояния при введении никеля в покрытие на основе Ti-Al-Mo-N; 3) обнаружен эффект адаптации покрытий в условиях трения и воздействия агрессивных сред, связанный с формированием твердого смазочного слоя в случае сухого трения и активизации механизма пассивации поверхности за счет восходящей диффузии алюминия в случае работы покрытий в кислотных и щелочных средах.

Практическая значимость работы

По результатам проведенных в ходе диссертационной работы исследований Сергеевниным В.С. сформулированы способы и режимы осаждения разработанных наноструктурных покрытий Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N, получены патент и ноу-хау, а также комплект нормативно-технической документации на каждый из составов. Модельные исследования покрытий на операциях сухого резания и в условиях работы деталей погружных лопастных насосов для перекачки технической воды продемонстрировали высокую стойкость разработанных покрытий по сравнению с непокрытыми материалами. Указанное выше свидетельствует о высокой практической значимости диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Результаты, представленные в диссертационной работе Сергеевнина В.С., подтверждены большим объемом экспериментального материала, полученного на современном сертифицированном оборудовании с использованием общепризнанных методик, их системным анализом и обработкой. Заключение о высоких эксплуатационных характеристиках покрытий в качестве защитных в меняющихся условиях трения подтверждаются проведенными стендовыми испытаниями их стойкости на операциях резания, а также в условиях трения, гидроабразивного изнашивания и ударного воздействия. Отмеченное выше свидетельствует о достоверности и надежности полученных результатов.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 145 страниц основного текста, 8 таблиц, 59 рисунков. Список использованной литературы включает 194 наименования.

Во введении сформулирована решаемая в работе проблема, ее актуальность, цель работы, задачи исследования, научная и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы. В нем рассмотрены подходы к повышению износостойкости материалов, в частности, за счет применения защитных покрытий. Изучены различные классы покрытий, влияние параметров структуры на их свойства и существующие методы получения адаптивных материалов. Автор отмечает перспективность данного направления исследований и одновременное отсутствие на данный момент решений, позволяющих получить покрытие, характеризующееся адаптацией за счет комплексного изменения функциональных свойств в меняющихся условиях трения, и формирует ряд условий для получения таких материалов.

Во второй главе приведено описание использованных в работе методик и оборудования. Описаны режимы формирования покрытий в системах Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N на установке ионно-плазменного вакуумно-дугового осаждения, позволяющие получить многослойные наноструктурные покрытия, а также исследовательские и экспериментальные методики, такие как растровая и просвечивающая электронная микроскопия, наноиндентирование, трибологические испытания, измерительное царапание и др.

В третьей главе представлены результаты исследований параметров состава и структуры получаемых покрытий на основе Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N. Автором показано формирование многослойной структуры с чередованием слоев на основе нитридов титана и молибдена, а также снижение размера зерна нитридных фаз с 35 до 12 нм и периода модуляции с 50 до 35 нм при переходе от состава Ti-Al-Mo-N к Ti-Al-Mo-Ni-N за счет ограничения роста зародышей нитридных фаз. Также эффект релаксации макронапряженного состояния с $\sigma = -2,25$ ГПа для образца Ti-Al-Mo-N, до $\sigma = -0,58$ ГПа для Ti-Al-Mo-Ni-N за счет диссипации полей напряжений путем деформирования пластичной фазы Ni. Приведен модельный расчет формирования слоистой структуры покрытий при осаждении методом arc-PVD при заданных параметрах.

В четвертой главе представлены результаты исследований функциональных свойств наноструктурных мультислойных покрытий Ti-Al-Mo-N к Ti-Al-Mo-Ni-N и их взаимосвязь с характеристиками структуры и составом. Установлено, что твердость покрытий Ti-Al-Mo-N достигает 40 ГПа, с относительной работой пластической деформации 60 %. Такое повышение твердости с сохранением высокой пластичности

связаны с наноструктурированием нитридной составляющей покрытия и наличием слоистой архитектуры покрытия на основе нитридов TiN и Mo₂N. Результатом добавлением никеля является повышение твердости покрытия до 45 ГПа и относительной работы пластического деформирования до 70 % при снижении общего уровня остаточных макронапряжений. Показано, что коэффициент трения разработанных покрытий достигает 0,4 при отсутствии заметного износа в условиях испытаний до 500 °С. Снижение коэффициента трения в зоне контакта и изнашивания рабочих поверхностей связано с явлением адаптации покрытий путем образования в зоне трения оксида MoO₃, работающего в качестве твердого смазывающего материала, что подтверждается исследованиями состава покрытия в дорожках изнашивания. Установлено, что при нагреве на воздухе покрытия состава Ti-Al-Mo-Ni-N защищают подложку от окисления до 700 °С, что на 100 °С выше максимальной температуры работы покрытий Ti-Al-Mo-N. Приведены данные исследования электрохимического поведения покрытий, демонстрирующие, что покрытия, содержащие 8-15 ат. % Mo, в кислотных средах самопассивируются. Применение покрытий с более высоким содержанием Mo в кислотных и щелочных средах приводит к увеличению скорости растворения покрытия. Добавление никеля в покрытия системы Ti-Al-Mo-N с высоким содержанием молибдена изменяет характер коррозии с питтингового на островковый или послойный.

В этой же главе автор приводит результаты исследования стойкости покрытий в различных условиях изнашивания, таких как гидроабразивное и многоцикловое ударное воздействие, показывающие, что разработанные материалы характеризуются износостойкостью, до 8 раз превышающей твердый сплав ВК6 и до 4 раз превышающей стойкость покрытий TiAlN.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям, публикации и замечания к работе

По теме диссертационного исследования Сергеевнин В.С. опубликовал 18 работ, в том числе 10 статей в журналах рекомендованных ВАК и входящих в базы данных WOS и Scopus, среди которых 3 работы в журналах Q1; 8 тезисов докладов в сборниках трудов конференций. Им получены 1 патент РФ и 1 ноу-хау. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Сергеевнина В.С. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. Постановка задач исследования, методики их реализации, полученные результаты изложены с необходимой степенью подробности. Диссертация

написана четким и понятным языком, хорошо оформлена. Однако, в тексте работы присутствуют отдельные опечатки и редакционные неточности.

Отмечая положительные стороны выполненной диссертационной работы, вместе с тем по ней следует высказать некоторые замечания:

1) Покрытия позиционируются как материалы расширенной области применения, однако, основным материалом подложки, на который они наносились, был твердый сплав ВК6. Не проведено исследований по влиянию типа подложки на функциональные свойства разработанных покрытий.

2) Не исследованы покрытия с большим содержанием молибдена (более 30 ат.%). Возможно ли, что такие материалы проявят еще более высокие трибологические характеристики?

3) Следовало бы провести РФА полученных покрытий Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N на малых углах (менее 15 °) для уточнения наличия отдельных характеристических пиков возможных образовавшихся соединений.

4) Необходимо дать пояснения, с чем связано повышение хрупкости разрабатываемых покрытий при добавлении пластичного никеля, каков предел его добавления, а также привести физическую трактовку факта измельчения зеренной структуры в покрытии.

5) Универсальность покрытий, на которую в некоторой степени претендует автор, предполагает возможность осаждения их на изделия различной формы и размеров. Это потребует решения ряда технологических задач, с учётом особенностей использованной методики.

6) Общие замечания к оформлению рисунков: на многих рисунках, к примеру рис. 3.4, 3.9, 4.25 и др., не читабельны данные, что затрудняет их понимание.

Заключение

Высказанные замечания не оказывают влияние на положительную оценку диссертационной работы Сергеевнина В.С., являются рекомендательными или уточняющими отдельные вопросы. Работа выполнена на высоком уровне, полученные результаты характеризуются как научной новизной, так и практической значимостью. Всё отмеченное выше позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты.

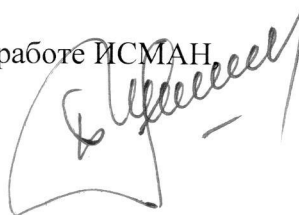
Диссертационная работа «Разработка наноструктурных износостойких покрытий Ti-Al-Mo-N и Ti-Al-Mo-Ni-N, адаптируемых к меняющимся условиям трения» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС", предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Сергеев Виктор Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по 2.6.17 – Материаловедение.

Диссертация заслушана на секции Ученого совета ИСМАН.

Протокол № 7 от «15» июля 2022 г.

Заместитель директора по научной работе ИСМАН

д.т.н.



П.М. Бажин

Выражаю свое согласие на обработку персональных данных.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН),

Адрес: 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.8, ИСМАН

Тел: + 74965246555, E-mail: bazhin@ism.ac.ru