

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Красикова Алексея Владимировича «Композиционные электрохимические покрытия для обеспечения износо- и коррозионной стойкости деталей машиностроения и приборостроения» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Диссертационное исследование посвящено исследованию композиционных электрохимических покрытий для обеспечения износо- и коррозионной стойкости деталей машиностроения и приборостроения.

Актуальность работы определяется тем, что в настоящее время в машиностроении и приборостроении широкое распространение получили электрохимические методы нанесения покрытий, характеризующиеся низкой себестоимостью, высокой производительностью и возможностью обработки изделий сложной формы. Рост требований к характеристикам машин и корпусов приборов отражается на требованиях к покрытиям, и гомогенные электрохимические покрытия часто им не удовлетворяют. Одним из путей развития гальванотехники является разработка технологий получения композиционных электрохимических покрытий (КЭП), которые за счет армирования обладают более высокими эксплуатационными характеристиками, чем стандартные гальванические покрытия.

В машиностроении существует ряд технологических проблем, которые невозможно решить за счет применения существующих стандартных электрохимических технологий. Решение этих проблем требует пересмотреть имеющиеся технологические подходы к получению КЭП, что обуславливает три актуальных направления в данной работе.

1. Разработка альтернативы стандартному процессу хромирования в электролитах на основе Cr(VI) , которая обеспечивает микротвердость до 10,8 ГПа (ГОСТ 9.303) и антикоррозионную защиту. Необходимо создать стабильную технологию, обеспечивающую осаждение неравновесного покрытия заданного состава, и установить взаимосвязь состава, структуры и свойств покрытий с условиями термообработки. При этом покрытия приобретают эксплуатационные свойства благодаря кристаллизации армирующих фаз.

2. Создание технологии осаждения классических КЭП в условиях вибрационного перемешивания для защиты от износа малогабаритных деталей машин с изменением механизма переноса частиц с электрофоретического на конвекционный с целью минимизации влияния электрокинетики частиц в электролите и обеспечения их равномерной доставки к поверхности.

3. Разработка КЭП с оксидной матрицей для защиты алюминиевых сплавов Al-Si с использованием совмещения метода «холодного» газодинамического напыления (ХГДН) алюмоматричных гетерогенных слоев и МДО для создания гибридных покрытий на любых металлах с композиционным керамическим финишным слоем, обладающим высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

В качестве **цели работы** автор выбирает повышение износо- и коррозионной стойкости деталей машиностроения и приборостроения за счет создания композиционных электрохимических покрытий и технологий их получения с использованием контролируемой кристаллизации из неравновесного состояния, вибрационного перемешивания электролитов с дисперсными частицами и оксидирования алюминиевых сплавов.

В ходе выполнения исследования автором ставятся и успешно решаются следующие задачи:

Ин-т «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1448/01-88654	ло
«10» 06.2016 г.	№
Осн. 10 л.	подп.
Прим. —	п

1 Разработать кристаллизационные КЭП на основе вольфрамсодержащих сплавов и технологию их получения для защиты крупногабаритных деталей машин.

1.1. Установить взаимосвязь между кинетикой осаждения и микроструктурой исходных неравновесных вольфрамсодержащих покрытий для синтеза кристаллизационных КЭП.

1.2. Установить закономерности электроосаждения неравновесных покрытий Ni-W и Co-W при использовании ванны с разделенными катодным и анодными пространствами, определить составы электролитов и режимы осаждения, обеспечивающие содержание вольфрама в покрытии 44–45 %.

1.3. Определить взаимосвязь коррозионной стойкости покрытий Ni-W и Co-W в исходном состоянии с их элементным и фазовым составом.

1.4. Исследовать влияние условий термической обработки на фазовые превращения в неравновесных покрытиях Ni-W и Co-W и разработать режим их термической обработки для получения КЭП за счет контролируемой кристаллизации интерметаллидов.

1.5. Разработать способ повышения микротвердости кристаллизационных КЭП на основе системы Ni-P, за счет легирования W обеспечивающий микротвердость на уровне твердых хромовых покрытий, для защиты деталей из материалов, подвергаемых среднему отпуску.

2. Разработать научные основы осаждения классических КЭП для обеспечения износостойкости малогабаритных деталей машин при вибрационном перемешивании электролита-суспензии без применения поверхностно-активных веществ.

2.1. Установить взаимосвязь объемной доли армирующей фазы в покрытии Ni-SiC с частотой и амплитудой колебаний вибрационной мешалки для микрометрового и субмикронного порошка SiC.

2.2. Определить зависимости объемной доли армирующей фазы и микротвердости КЭП от концентрации микрометрового и субмикронного порошка в электролите для систем Ni-SiC и Ni-алмаз.

2.3. Исследовать влияние включения частиц SiC и алмаза различной дисперсности на микроструктуру матриц КЭП, полученных при вибрационном перемешивании электролита без добавления поверхностно-активных веществ.

3. Разработать основы получения конверсионных КЭП на сплавах и гетерофазных покрытиях на основе алюминия.

3.1. Для формирования конверсионного КЭП на силумине АК7ч разработать электролит анодирования с учетом особенностей микроструктуры сплава, выбрать режим и длительность анодирования, установить взаимосвязь кинетики анодирования сплава АК7ч с его микроструктурой и разработать технологию получения износостойких композиционных покрытий.

3.2. Установить возможность синтеза КЭП за счет микродугового оксидирования композиционных покрытий, полученных методом напыления.

3.3. Разработать научные основы получения металлокерамических покрытий с оксидной матрицей, полученной МДО, наполненной никелем за счет его электрохимического осаждения в поры матрицы.

Судя по автореферату, диссертационное исследование Красикова А.В. обладает научной новизной и практической ценностью.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Установлена взаимосвязь между кинетикой осаждения и микроструктурой исходных покрытий Ni-W. Показано, что рост покрытия происходит через стадию образования промежуточных короткоживущих соединений (интермедиатов), содержащих и никель, и вольфрам.
2. Предложен новый метод получения композиционных электрохимических покрытий, основанный на кристаллизации неравновесных электроосажденных покрытий при термической обработке. Установлено, что термообработка покрытий Ni-W и Co-W при 500°C приводит к увеличению микротвердости до величин 12,8 и 9,5 ГПа соответственно, за счет кристаллизации твердого раствора и переходом от квазиаморфного к нанокристаллическому состоянию без выделения интерметаллидов. В системе Co-W обнаружена одновременная кристаллизация твердого раствора на основе кобальта как с ГПУ, так и ГЦК кристаллической решеткой, что объясняется стабилизацией ГЦК решетки вольфрамом. Выделение интерметаллидных частиц в обоих сплавах наблюдается начиная с температуры термообработки 600°C, что подтверждено просвечивающей электронной микроскопией. При этом достигаются значения микротвердости 13,0 ГПа для покрытия Ni-W и 13,6 ГПа для Co-W. Повышение температуры термообработки до 750°C вызывает снижение микротвердости вследствие роста кристаллитов покрытия. Обнаружена смена механизма кристаллизации покрытия Ni-W в интервале температур 600°C – 750°C.
3. Создан способ повышения микротвердости кристаллизационных КЭП на основе системы Ni-P за счет легирования вольфрамом их матрицы. Показано, что при термообработке при 350°C в покрытии Ni-11,5 % P-5,0 % W происходит выделение фосфидов Ni_3P и Ni_5P_2 . Легирование покрытий Ni-11,5 % P вольфрамом повышает микротвердость с 5,1 до 6,1 ГПа в электроосажденном состоянии и с 8,8 до 10,1 ГПа в термообработанном. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что при термообработке покрытия Ni-P-W вольфрам локализуется в нанокристаллической матрице покрытия, представляющей собой твердый раствор Ni-20 % W, обеспечивая ее упрочнение.
4. Разработаны конструкции устройства и способ получения покрытий с использованием вибрационного перемешивания электролита-суспензии для электроосаждения КЭП, позволяющие формировать равномерно армированные покрытия вопреки седиментации и электрофоретическим процессам за счет конвекционного механизма доставки частиц к катоду. Установлено, что для частиц порошков размером 5–7 мкм увеличение частоты колебаний снижает объемную долю частиц в покрытии, для мелкодисперсных порошков (менее 2,5 мкм) установлена обратная зависимость. Показано, что для осаждения КЭП с крупными частицами целесообразно использовать частоту колебаний мешалки 25 Гц, а с мелкодисперсными – 100 Гц. Увеличение амплитуды колебаний в диапазоне от 1 до 3 мм повышает объемную долю частиц в покрытии в 1,5–1,7 раз, но приводит к неоднородному распределению частиц по поверхности детали. На основании установленных зависимостей объемной доли армирующей фазы от частоты колебаний вибрационной мешалки предложен способ регулирования микроструктуры КЭП, позволяющий создавать градиентные и слоистые покрытия.
5. Определено, что минимальное содержание соосажденных армирующих частиц в КЭП, ниже которого их внедрение оказывает слабое влияние на микротвердость покрытий, составляет 6–8 об. %. Внедрение частиц или их агломератов в матрицу КЭП приводит к уменьшению размера зерна, интенсивность которого снижается по мере удаления от центра частицы (или агломерата). Экспериментально подтверждено, что введение частиц в покрытие увеличивает микротвердость как за счет введения сверхтвердого компонента, так и за счет изменения размера зерна матрицы. В

системе Ni-алмаз (размер частиц 5–7 мкм) увеличение модуля Юнга матрицы составляет 35 %, и твердости на 57 % по сравнению с гомогенным никелем, осажденным в идентичных условиях.

6. При синтезе конверсионных КЭП на сплаве АК7ч установлены причины удаления частиц кремния из оксидного слоя в процессе анодирования и образования покрытий с низкими характеристиками. Определено, что кристаллы кремния замедляют формирование барьерного слоя и вызывают разупорядочение пористой части анодного оксидного слоя, что приводит к локальному травлению покрытия. Снижение агрессивности электролита анодирования за счет добавления щавелевой кислоты и интенсификация отвода тепла за счет перемешивания раствора позволяют получать КЭП «анодный оксид алюминия – кремний» и обеспечивают стабильность технологического процесса.

Практическая значимость работы усматривается в том, что:

Разработанные научные, технологические и материаловедческие основы формирования композиционных электрохимических покрытий позволяют целенаправленно создавать покрытия с заданной микроструктурой, предопределяющей их свойства. Практическое использование результатов и разработок, полученных в ходе выполнения данной диссертационной работы, подтверждается актами внедрения от ПАО «Пролетарский завод», ООО «Невский инструментальный завод» и ООО «СП Инжиниринг».

На ПАО «Пролетарский завод» апробировано нанесение защитного покрытия Ni-P-W на экспериментальный контршток гидроцилиндра и показано соответствие эксплуатационных свойств покрытия требованиям ГОСТ 9.303, предъявляемым к хромовым покрытиям. Технология признана перспективной для защиты штоков гидроцилиндров судовых машин.

На ООО «Невский инструментальный завод» проведены ходовые испытания экспериментального радиально-поршневого гидромотора типа NMSE05, в конструкции которого применены поршни с износостойким покрытием Ni-SiC. По отношению к статистике отказов разработанное покрытие повышает ресурс гидромоторов в 8,5 раз, обеспечивает надежную эксплуатацию и перспективно для дальнейшего применения в данном и аналогичных узлах.

На ООО «СП Инжиниринг» получено композиционное покрытие на опытной партии корпусов ВХ31В-1 из эвтектического силумина ADC12 в количестве 24 шт., и технология его получения признана перспективной для использования в радиоэлектронных приборах.

Автором получено 6 патентов на изобретения.

Что касается личного вклада автора, то он заключается в выборе направлений исследований, постановке задач, постановке и проведении комплексных экспериментов в части синтеза и исследования образцов полученных материалов, представлении результатов работ в публикациях и на научных конференциях. Все результаты получены лично либо при непосредственном участии автора.

Достоверность представленных в работе исследований подтверждена использованием современного метрологически поверенного оборудования, аттестованных методик выполнения измерений, воспроизводимостью получаемых результатов и их верификацией с помощью комплекса взаимодополняющих, взаимоуточняющих методов. Полученные результаты соответствуют современным представлениям электрохимии и материаловедения.

Работа прошла достаточную **апробацию**. Основные результаты работы изложены на IX конференции молодых ученых и специалистов, СПб, 2010 г.; XIX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии, Волгоград, 2011 г.; XII Международной конференции молодых ученых и специалистов, СПб, 2013 г.; XX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии,

Екатеринбург, 2016 г.; Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Современное материаловедение: традиции отечественных научных школ и инновационный подход», Геленджик, 2017 г.; XV Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе, Москва, 2017 г.; III Международной научно-технической конференции «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате», Геленджик, 2018 г.; XVI молодежной научно-практической конференции «Взгляд в будущее», СПб, 2018 г.; VI Всероссийской научно-практической конференции с участием молодых ученых, СПб, 2020 г.; VIII International Conference «Functional Nanomaterials and High-Purity Substances» (FNM-2020), Суздаль, 2020 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металломатричных композиционных материалов», Москва, 2021 г.; IX форуме «Open Science 2022», Гатчина, 2022 г, Международной научно-технической конференции молодых ученых IMT-2023, Минск, 2023 г., XXII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии, Сочи, 2024 г.

При этом основное содержание работы опубликовано в 38 печатных работах, в том числе в 32 статьях в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, из них 17 публикаций издано на английском языке и индексируются в базе данных SCOPUS (ID 27368080000), получено 6 патентов РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения; семи глав, заключения и списка литературы из 416 наименований.. Общий объем диссертации 355 страниц, включая 35 таблиц и 156 рисунков.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) в части формулы и области исследования.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения выносимые на защиту, приведен список публикаций.

В первой главе рассмотрены основные аспекты получения композиционных электрохимических покрытий. Значительное внимание уделено электроосаждению неравновесных слоев для формирования кристаллизационных КЭП. Проанализированы теоретические и практические особенности электроосаждения покрытий из бинарных сплавов Fe-Mo, Fe-W, Co-Mo, Co-W, Ni-Mo, Ni-W. Отмечено, что несмотря на обилие публикаций и ряд теоретических моделей осаждения таких покрытий, предложенных научным сообществом, в литературных источниках отсутствует объяснение причин осаждения сплавов Mo и W в виде перенасыщенных твердых растворов и формирования нанокристаллической или квазиаморфной структуры. В главе рассмотрены теоретические и технологические особенности осаждения сплавов Mo и W, их микроструктура, свойства и влияние на них условий термообработки.

На основании обзора литературы сформулированы основные направления исследований. Для защиты крупногабаритных изделий с помощью кристаллизационных КЭП обоснован выбор систем Ni-W и Co-W, для обеспечения износостойкости малогабаритных деталей машин – осаждение КЭП систем Ni-SiC и Ni-алмаз в условиях вибрационного перемешивания, а для защиты материалов на основе алюминия – использование КЭП конверсионного типа, основанные на использовании особенностей микроструктуры основного металла.

Во второй главе описаны лабораторные установки для получения образцов покрытий, материалы и реактивы, приведено описание приборной и методологической базы, использованной для выполнения исследований.

Третья глава работы посвящена исследованию процессов формирования кристаллизационных КЭП за счет термообработки электроосажденных неравновесных сплавов и изучению их структуры.

Установлена взаимосвязь между кинетикой осаждения и микроструктурой исходных неравновесных покрытий Ni-W. Исследована взаимосвязь технологических параметров получения покрытий, их структурой, физико-механическими и коррозионными характеристиками.

Обнаружена интересная закономерность для нанопокровтий Ni-W: при уменьшении размера зерна материала ниже некой пороговой точки, лежащей в нанометровом диапазоне, материал начинает разупрочняться, что обусловлено сменой механизма деформации (обратный эффект Холла – Петча). Изначально квазиаморфное покрытие Ni-W находится в области действия обратного эффекта Холла – Петча. В этом состоянии благодаря значительной объемной доле межзеренных границ деформация осуществляется преимущественно за счет их скольжения, а не за счет движения дислокаций внутри кристаллита. По мере увеличения размера кристаллитов материал упрочняется, приближаясь к пороговой точке, после которой вступает в силу прямое соотношение Холла – Петча.

Установлено, что термообработка покрытий Ni-W и Co-W повышает их коррозионную стойкость. Показано, что скорость коррозии покрытия Ni-W в 3,5 %-ном растворе NaCl снижается с 15 мг/(м²·ч) в исходном состоянии до 9 мг/(м²·ч) после термообработки при 600 °С. Для покрытия Co-W эти значения составляют 18 и 11 мг/(м²·ч) соответственно.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке методов упрочнения кристаллизационных покрытий за счет легирования матрицы. Высокие температуры термообработки покрытий Ni-W и Co-W ограничивают область их применения материалами с высоким отпускком. Поэтому необходима разработка таких систем покрытий, в которых возможно получение армирующих фаз при относительно низкой температуре. Для этого выбраны электрохимически осажденные покрытия системы Ni-P, которые после термообработки упрочняются за счет кристаллизации фосфида Ni₃P, но не обеспечивают микротвердость твердого хромирования, а для повышения уровня микротвердости применено легирование данного покрытия вольфрамом.

Проведенные комплексные исследования позволили разработать метод получения кристаллизационных КЭП с низкой температурой термообработки для использования на изделиях, изготовленных из широкого спектра сталей и сплавов, в том числе, подвергаемых среднему отпуску.

Пятая глава посвящена исследованию процесса нанесения, структуры и свойств классических КЭП, полученных за счет соосаждения дисперсных частиц с металлической матрицей в условиях вибрационного перемешивания.

В результате показано, что применение виброперемешивания позволяет не только решить проблему противодействия седиментации и электрокинетическим процессам при получении покрытий, но и обеспечивает возможность установления влияния армирующей фазы на микроструктуру матрицы классических КЭП.

В главе 6 рассмотрены процессы получения конверсионных КЭП на алюмоматричных материалах, которые формируются с использованием микроструктуры основного металла за счет превращения его металлической фазы в матрицу покрытия. Рассмотрены кинетика роста композиционных покрытий при анодировании гетерогенного сплава АК7ч, получение КЭП за счет микродугового оксидирования гетерогенных слоев и синтез композиционных покрытий за счет заполнения металлом пор в оксидной матрице, полученных микродуговым оксидированием.

Также в работе получено и испытано КЭП, сформированное МДО гетерофазного слоя $Al/\alpha-Al_2O_3$, напыленного методом ХГДН. Данное покрытие помимо высокой микротвердости и износостойкости обладает коррозионной стойкостью в хлоридной среде. Однако данная технология имеет ограничения по геометрии защищаемой детали, которые обусловлены возможностями оборудования для напыления гетерофазного слоя.

В главе 7 обобщены полученные результаты исследований, для чего проведен анализ особенностей разработанных технологий и сравнение эксплуатационных свойств, на основании чего определены области их применения. Описаны примеры практического применения разработанных технологий получения КЭП.

Оценка эксплуатационных свойств разработанных покрытий выполнена по результатам испытаний на микротвердость, износостойкость и коррозионную стойкость.

Рекомендованы области применения разработанных покрытий. Для защиты малогабаритных деталей целесообразно осаждение классических КЭП из электролитов с дисперсными частицами в условиях вибрационного перемешивания. Метод не имеет ограничений по маркам сталей и сплавов, но ограничен габаритами деталей. Для покрытия крупногабаритных деталей целесообразно использовать кристаллизационные КЭП, выбор системы покрытия обусловлен как уровнем требуемых свойств, так и материалом изделия. Поскольку для нанесения прекурсорных слоев из неравновесных сплавов не используются электролиты-суспензии, обеспечивается однородность химического состава по поверхности детали. В дальнейшем, при термообработке происходит равномерное образование армирующей фазы. Для защиты алюминиевых сплавов экономически целесообразно использование конверсионных КЭП. Для защиты литых деталей сложной формы из силуминов рекомендовано использование анодирования, для повышения износостойкости алюмоматричных покрытий – МДО, а для однородных алюминиевых сплавов – керамоматричные конверсионные КЭП.

Разработанные в работе покрытия были опробованы на образцах деталей машиностроения и приборостроения из различных материалов. На производственной площадке ПАО «Пролетарский завод» на экспериментальный контршток было нанесено кристаллизационное КЭП системы Ni-P-W. Испытания на соответствие требованиям, предъявляемым к хромовым покрытиям, показало перспективность его применения для защиты штоков гидроцилиндров, используемых в различных судовых машинах.

Разработанный метод получения классических КЭП при вибрационном перемешивании электролита был использован для получения покрытий Ni-SiC с размером частиц 5–7 мкм, предназначенных для обеспечения работоспособности поршней гидромоторов производства ООО «Невский инструментальный завод». Без покрытия срок эксплуатации двигателя ограничен 100 ч. Ходовые испытания опытной партии поршней в течение 1000 ч показали высокую износостойкость покрытия.

Предложенные методы получения конверсионных КЭП были опробованы на опытной партии корпусов ВХ31В-1 из сплава ADC12 (аналог АК12) для получения износостойких защитно-декоративных покрытий. Применение электролита и режима анодирования, разработанных для сплава АК7ч, обеспечивает нанесение КЭП с высокими защитно-декоративными свойствами.

В результате выполнения диссертационной работы разработаны научные основы получения КЭП, в том числе, новых типов, а также разработан и внедрен комплекс технологий получения покрытий с высокой микротвердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью для защиты деталей машиностроения и приборостроения, а именно:

1. Разработана технология получения кристаллизационных КЭП на основе систем Ni-W и Co-W.
 - 1.1 Установлена взаимосвязь между кинетикой осаждения и микроструктурой неравновесных нанокристаллических или квазиаморфных покрытий Ni-W.
 - 1.2 Установлены закономерности электроосаждения неравновесных покрытий Ni-W и Co-W. На основании экспериментальных данных разработаны составы электролитов и технологические режимы получения покрытий Ni-W и Co-W без микротрещин с содержанием вольфрама до 44–45 мас. % W.
 - 1.3 Установлено, что после термообработки, обеспечивающей формирование КЭП, происходит снижение скорости коррозии, что объясняется кристаллизацией твердого раствора и увеличением размера кристаллитов покрытия. Благодаря образованию пассивных пленок на поверхности покрытий Ni-W и Co-W их коррозионная стойкость значительно превышает стойкость изделий из низколегированных сталей без покрытий.
 - 1.4 Исследовано влияние условий термообработки покрытий Ni-W и Co-W на фазовые превращения. Установлено, что при температуре 500 °С в неравновесных покрытиях систем Ni-W и Co-W происходит кристаллизация неравновесных твердых растворов. на основании этого разработан режим получения КЭП систем Ni-W и Co-W за счет контролируемой кристаллизации интерметаллидов, при этом рекомендован режим термообработки 600 °С, 5 ч.
 - 1.5 При этом для достижения оптимальных значений микротвердости и износостойкости требуется термообработка при 600 °С. Покрытия на основе систем Ni-W и Co-W допустимы только для изделий из сталей и сплавов с высоким отпуском. Для получения кристаллизационных КЭП на материалах, подвергаемых среднему отпуску разработана технология осаждения квазиаморфного покрытия Ni-P-W, содержащего 11,5 % P и 5 % W.
2. Созданы научные основы осаждения КЭП из электролитов-суспензий при вибрационном перемешивании.
 - 2.1 При этом вибрационное перемешивание электролитов-суспензий позволяет получать композиционные покрытия вопреки седиментации и отрицательному ζ -потенциалу частиц. Показана возможность регулирования микроструктуры композиционных покрытий за счет изменения частоты колебаний вибрационной мешалки, что позволяет концентрировать армирующую фазу в наиболее нагруженных слоях покрытия, снижая расход дорогостоящих порошков.
 - 2.2 Анализ зависимостей микротвердости от объемной доли частиц показал существование минимального порога армирования, ниже которого внедренные в КЭП частицы не оказывают значительного влияния на их упрочнение, для системы Ni-алмаз эта величина составляет 6–8 об. %.
 - 2.3 Установлено, что введение частиц в покрытие оказывает влияние на механические свойства покрытия и за счет введения сверхтвердого компонента, и за счет изменения свойств матрицы, обусловленного измельчением ее зерна. Так в системе Ni-алмаз (размер частиц 5–7 мкм) увеличение модуля Юнга матрицы составляет 35 %, и твердости 57 % по сравнению с гомогенным никелем, осажденным в идентичных условиях.
3. Для обеспечения износостойкости материалов на основе алюминия созданы конверсионные КЭП, принцип получения которых состоит в селективном превращении металлической

фазы обрабатываемой поверхности в оксидную матрицу и использования микроструктуры исходного материала.

- 3.1 Установлены режим и длительность анодирования сплава АК7ч, позволяющие формировать КЭП толщиной до 30 мкм с износостойкостью в 2 раза выше, чем у неармированных анодных покрытий на гомогенных сплавах.
- 3.2 Получены композиционные электрохимические покрытия с использованием микродугового оксидирования гетерофазных покрытий с алюминиевой матрицей, сформированных методом напыления с высокими защитными антикоррозионными свойствами, при этом область применения данной технологии ограничена геометрией покрываемой детали и возможностями технологии порошкового напыления.
- 3.3 Разработаны научные основы и методы получения композиционных керамоматричных покрытий на алюминии, основанный на синтезе пористой оксидной матрицы методом микродугового оксидирования и электрохимическом заполнении пор никелем с высокой износостойкостью и устойчивостью к щелочам.
4. Определены области применения композиционных покрытий:
 - для защиты малогабаритных деталей целесообразно осаждение классических КЭП в условиях вибрационного перемешивания;
 - для обеспечения износостойкости или антикоррозионной защиты крупногабаритных деталей машин возможно использование кристаллизационных КЭП;
 - для сталей и сплавов, подвергаемых высокому отпуску целесообразно использование покрытий системы Ni-W, для материалов со средним отпуском – покрытий Ni-P-W;
 - для пар трения скольжения в отсутствие хлоридов перспективны покрытия Co-W;
 - для обеспечения износостойкости деталей из литейных сплавов или композитов на основе алюминия наиболее эффективен синтез конверсионных КЭП методами оксидирования;
 - при этом конверсионные КЭП, полученные методами микродугового оксидирования напыленных композиционных слоев обеспечивает высокую коррозионную стойкость, но имеют ограничения по сложности формы детали.
5. Результаты работы получили практическое применение в качестве альтернативы покрытию «хром твердый» (опробовано в условиях ПАО «Пролетарский завод»), для обеспечения работоспособности поршней роторно-поршневого гидромотора NMSE05 производства ООО «Невский инструментальный завод», а также для придания износостойкости корпусам РЭА из сплава ADC12, использованных ООО «СП Инжиниринг», что подтверждено актами внедрения.

Выводы по главам и заключение по представленной работе информативны и логичны и соответствуют положениям, выносимым на защиту.

Содержание автореферата отражает основные положения диссертации.

Автором сформулированы для защиты шесть научных положений, которые по изложению материала автореферата можно считать доказанными.

Автореферат написан хорошим технически грамотным языком и его оформление соответствует требованиям по оформлению, а содержание – паспорту специальности 2.6.17.

Отмечая актуальность, новизну и практическую значимость исследования, следует сделать все же некоторые замечания:

- В главе 3 отмечено, что термообработка покрытий Ni-W и Co-W существенно повышает их коррозионную стойкость, однако не приведено объяснения данного эффекта. Возможно, такое объяснение присутствует в тексте самой диссертационной работы.
- В главе 6 получено и испытано покрытие, сформированное методом МДО гетерофазного слоя Al/ α -Al₂O₃, напыленного методом ХГДН. При этом нет никакой информации о параметрах метода ХГДН, кроме ограничений на форму и размер деталей.

Указанные замечания не снижают научной и практической полезности диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

Судя по автореферату, диссертация Красикова Алексея Владимировича «Композиционные электрохимические покрытия для обеспечения износо- и коррозионной стойкости деталей машиностроения и приборостроения», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным в п.9 Постановления Правительства РФ «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 года № 842 в текущей ред. (вместе с «Положением о присуждении ученых степеней»), а ее автор Красиков Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Титов Александр Олегович	/  /
Ученая степень	доктор технических наук, (специальность 2.6.1, технические науки)
Должность	ведущий научный сотрудник
Структурное подразделение организации	Материаловедческо-технологический отдел П-820
Полное наименование организации	Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»
Адрес организации	123098, Москва, ул. Рогова, д.5а
Интернет-сайт организации	https://vniinm.tvel.ru
e-mail автора отзыва	AOTitov@bochvar.ru
Телефон автора отзыва	+7 (499)-190-8999, доб. 81-13

Я, Титов Александр Олегович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись А.О. Титова заверяю

Корниенко Михаил Юрьевич
Заместитель генерального директора
по оборонной тематике- директор отделения





ознакомлен 
10.06.26