

ДОУ	Б.х. №	1293 / 01 - 28 / 500	№
	« 22 » 05 2026 г.	подп.	
	« 5 » п.		
	Прил. — п.		

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.т.н., доцента Жукова Ильи Александровича

на диссертационную работу Красикова Алексея Владимировича на тему:

«Композиционные электрохимические покрытия для обеспечения износо- и коррозионной стойкости деталей машиностроения и приборостроения», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа А.В. Красикова направлена на решение одной из ключевых проблем современного материаловедения — разработку новых экологических и энергосберегающих технологий покрытий взамен классического хромирования, а также обеспечение работоспособности деталей из легких сплавов в экстремальных условиях эксплуатации. Разработка научных основ синтеза композиционных электрохимических покрытий (КЭП) новых типов с высокими износо- и коррозионной стойкостью является приоритетной задачей, полностью соответствующей паспорту специальности 2.6.17 Автор выделяет три принципиально разных технологических направления, позволяющих преодолеть ограничения существующих методов, что подчеркивает высокую актуальность работы.

Основное содержание работы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 416 источников и приложений. Общий объем составляет 355 страниц, включая 156 рисунков и 35 таблиц. Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту. **Первая глава** содержит глубокий анализ научной литературы, охватывающий как классические подходы к получению КЭП из электролитов-суспензий, так и процессы индуцированного соосаждения сплавов тугоплавких металлов. Автор критически оценивает существующие модели и выявляет неизученные области, касающиеся механизмов формирования неравновесных структур и управления распределением армирующей фазы при перемешивании. **Вторая глава** методически полно описывает синтез образцов (включая разработанные автором мембранные электролизеры и вибрационные установки), современные методы исследований (ПЭМ, ДОРЭ, ДСК, ионное травление) и коррозионно-механические испытания, обеспечивающие высокую достоверность результатов. **Третья и четвертая** главы посвящены кристаллизационным

процессам КЭП. В них устанавливается взаимосвязь кинетики осаждения и аморфно-нанокристаллической структуры неравновесных твердых растворов Ni-W и Co-W через образование биметаллических кластеров; детально исследованы фазовые превращения при термообработке; разработана низкотемпературная система Ni-P-W, в которой легирование матрицы вольфрамом обеспечивает микротвердость на уровне 10,1 ГПа. **Пятая глава** раскрывает научные основы осаждения классических КЭП Ni-SiC и Ni-алмаз в условиях вибрационного перемешивания без ПАВ. Определено влияние параметров вибрации на объемную долю частиц в зависимости от их дисперсности, установлен порог армирования (6-8 об. %), влияющий на микротвердость, и доказан механизм упрочнения матрицы за счет дробления ее зерна (увеличение модуля Юнга на 35 %, твердости – на 57 % в системе Ni-алмаз). **Шестая глава** посвящена конверсионным КЭП на алюминиевых сплавах методами анодирования и микродугового оксидирования (МДО). Автор выявляет причину неоднородности барьерного слоя на силуминах (влияние нанокристаллов вторичного кремния), разрабатывает серно-щавелевокислый электролит, сохраняющий армирующую кремниевую фазу, и предлагает оригинальную технологию заполнения пор МДО-покрытий никелем. В **седьмой главе** проведено обобщение результатов и сопоставление свойств покрытий всех типов, даны рекомендации по областям применения в зависимости от материалов и геометрии деталей. Приведены акты промышленной апробации на ПАО «Пролетарский завод», ООО «Невский инструментальный завод» и ООО «СП Инжиниринг».

Научная новизна работы.

Научная новизна диссертации заключается в развитии нового научного направления – создание композиционных электрохимических покрытий с управляемой композитной наноструктурой методами контролируемой кристаллизации и конверсионного окисления. К числу наиболее значимых результатов следует отнести следующее:

1. Установление механизма образования неравновесных пересыщенных твердых растворов Ni-W и Co-W через стадию биметаллических кластеров Ni_xW_y , что позволило объяснить природу их аморфизации и нанокристалличности.

2. Создание кристаллизационных КЭП с матрицей из наноразмерного твердого раствора и частицами интерметаллидов Ni_4W и NiW , обеспечивающих рекордную микротвердость до 13,0 ГПа (Ni-W) и 13,6 ГПа (Co-W), превышающую уровень твердого гальванического хрома.

3. Разработку низкотемпературного кристаллизационного КЭП Ni-P-W, в котором легирование вольфрамом матрицы твердого раствора приводит к упрочнению на 30 % по сравнению с Ni-P, достигая микротвердости 10,1 ГПа после термообработки при 350 °C.

4. Установление эффекта экранирования электрического поля адсорбированными частицами, ответственного за дробление зерна металлической матрицы классических КЭП, и установление его количественного вклада в упрочнение (рост твердости никелевой матрицы на 57 % в системе Ni-алмаз).

5. Выявление роли нанокристаллов вторичного кремния силуминов в подавлении формирования барьерного слоя при анодировании, что стало научной основой технологии конверсионных КЭП на Al-Si сплавах.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии физико-химических представлений о механизмах индуцированного соосаждения, структурообразования композиционных покрытий при вибрационном перемешивании и кинетике формирования оксидных слоев на гетерофазных сплавах. Практическая значимость подтверждена разработкой 6 патентов РФ на способы получения покрытий Ni-P-W, Ni-SiC, конверсионных КЭП и металлокерамических покрытий, а также внедрением технологий на профильных предприятиях:

- ПАО «Пролетарский завод» (технологичная и экологичная альтернатива шестивалентному хромированию);
- ООО «Невский инструментальный завод» (повышение ресурса гидромоторов в 8,5 раз);
- ООО «СП Инжиниринг».

Замечания и вопросы по диссертационной работе.

Несмотря на общее положительное впечатление, по работе имеются следующие замечания и вопросы, требующие пояснения автора.

1. В диссертации реализован на практике единый методологический подход, основанный на гипотезе о том, что целенаправленное создание ультрамелкозернистой или нанокompозитной структуры матрицы покрытия является ключом к достижению высоких эксплуатационных свойств. Этот подход последовательно доказывается для трех технологических путей: кристаллизации метастабильных осадков, конвективного захвата частиц при контролируемой гидродинамике и селективного конверсионного окисления. К сожалению, в тексте работы эта объединяющая научная гипотеза в явном виде не сформулирована, а методология не вынесена в отдельный раздел (обычно в главе 2), что несколько размывает восприятие единого научного замысла.

2. Цель работы сформулирована в практическом ключе как «повышение износ- и коррозионной стойкости... разработка комплекса технологий». Учитывая, что в диссертации на самом деле детально выявлены и проанализированы фундаментальные

физико-химические закономерности (механизм индуцированного соосаждения, взаимосвязь кинетики с неравновесностью структуры, механизмы дробления матрицы), было бы уместно отразить это в цели работы. Является ли с точки зрения автора установление комплекса закономерностей «условия синтеза – микроструктура – эксплуатационные свойства» для трех новых типов КЭП основной научной целью работы, а технологическая часть – средством верификации и прикладным результатом?

3. В разделе 3.4.3 показано, что Co-W покрытия с высоким содержанием вольфрама активно наводороживаются, что после отжига приводит к формированию пористости и обнаруженному соединению $(\text{Fe}, \text{Co})_6\text{W}_6\text{C}$ вблизи границы с основой. Может ли наблюдаемый эффект охрупчивания и пористости накладывать принципиальные ограничения на применение таких покрытий в условиях циклических нагрузок? Какие возможны пути дегазации таких покрытий до или в процессе термообработки?

4. В работе большое внимание уделено сравнению с гальваническим хромом. Хотелось бы понять каковы сравнительные преимущества и недостатки, например, разработанного КЭП Ni-P-W перед современными коммерческими покрытиями на основе химически осажденного композита Ni-P-SiC или Ni-P-ПТФЭ зарубежных компаний?

5. В работе на высоком уровне продемонстрирована взаимосвязь между химическим и фазовым составом покрытий, параметрами их тонкой структуры (размер зерна, наличие наночастиц) и механическими характеристиками (микротвердость, износостойкость). Однако для покрытий, эксплуатируемых в условиях трения и коррозии, критическое значение имеют также трещиностойкость, уровень и знак внутренних напряжений, способность к релаксации напряжений без образования микротрещин. Проводились ли оценки остаточных напряжений, пластичности или вязкости разрушения разработанных покрытий, особенно для наиболее твердых и потенциально хрупких систем Ni-W и Co-W? Как, по Вашему мнению, эти характеристики могут повлиять на эксплуатационную надежность деталей с такими покрытиями?

Заключение

Приведенные замечания носят дискуссионный и рекомендательный характер и не затрагивают основных научных положений, выносимых на защиту, а также не снижают высокой общей оценки выполненной работы. Диссертация Красикова Алексея Владимировича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и научно-технологические решения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в материаловедении композиционных электрохимических покрытий, имеющее важное народно-хозяйственное значение для машиностроения.

По актуальности, объему выполненных исследований, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а ее автор, Красиков Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Зав. лаб. нанотехнологий металлургии
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский государственный
университет», доктор технических наук по
специальности 2.6.17 (05.16.09) –
Материаловедение (химическая технология),
доцент



Жуков Илья
Александрович

Подпись Жукова И.А. заверяю:



Подпись удостоверяю
Ведущий документовед
Андрienko И. В



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

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, +7 (3822) 529-852, e-mail: rector@tsu.ru,
<http://www.tsu.ru>

Ознакомлен 
22.05.26