АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07110 «Материаловедение и технология новых материалов»

ЗЕЛЛЕЛЕ ДАНИЕЛЬ МЕКОННЕН

Электрохимический синтез и функциональные свойства композиционных покрытий на основе металлов и сплавов

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена экспериментальным исследованиям процессов формирования композиционных покрытий с улучшенными функциональными свойствами, полученных электрохимическим методом, а также изучению закономерностей образования кристаллов в объёме покрытий хром-графен и двойных сплавов на основе никеля и кобальта.

Актуальность темы исследования

Известно, что многие функциональные свойства, такие как антикоррозионные свойства, износостойкость, не всегда необходимы во всем объёме деталей машин и оборудования. Однако они существенны в поверхностных слоях составляющих элементов и позволяют продлевать срок эксплуатации и долговечности приборов и промышленного оборудования. Среди наиболее эффективных методов защиты главное место занимают композиционные электролитические покрытия (КЭП), которые представляют собой структурированные дисперсными частицами металлические матрицы, а также двойные сплавы.

Цель диссертационной работы:

Разработать, оптимизировать и охарактеризовать электрохимически синтезированные композиционные покрытия на основе металлов (хром-графен) и сплавов (никель-медь, кобальт-ванадий), а также установить взаимосвязь между структурой и функциональными свойствами.

Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие исследовательские задачи:

• Разработать и оптимизировать параметры электрохимического осаждения (состав электролита, pH, плотность тока) для получения равномерных и прочных композиционных покрытий на основе металлов и сплавов на различных подложках, а также исследовать влияние условий электрохимического синтеза на зародышеобразование, рост и микроструктурную эволюцию покрытий.

• Целью данного исследования является характеристика морфологических, структурных и композиционных особенностей нанесенных покрытий с использованием методов СЭМ/ЭДС, РСА, АСМ и соответствующих методов анализа поверхности, а также оценка ключевых функциональных свойств покрытий, таких как твердость и коррозионная стойкость, и выявление их корреляции с параметрами синтеза и микроструктурой.

• Установить взаимосвязь между структурой и свойствами, объясняющие, как методы электрохимического синтеза влияют на качество и функциональные характеристики покрытия и предложить оптимизированные электрохимические стратегии для получения высокоэффективных защитных и функциональных покрытий для промышленного применения.

Методы исследования

Состав и микроструктура КЭП исследовались методами оптической металлографии, спектрометрического и рентгеноструктурного анализа, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Для изучения коррозионных свойств были использованы гравиметрический и потенциодинамический методы, а также метод измерения электрического сопротивления. Физико-механические свойства были изучены методами измерения микротвердости. Математическое моделирование процесса формирования электролитических покрытий и прогнозирования функциональных свойств были проведены на основе законов электрохимии в электрометаллургии**.**

Объект исследования

Процесс формирования микроструктуры и функциональных свойств композиционных электролитических покрытий на основе хрома, никеля и кобальта под влиянием температуры и плотности тока.

Предмет исследования

Хром-графен, никель-медь, а также кобальт- ванадий электролитические покрытия на основе металлов и сплавов.

Научная новизна важность полученных результатов

Впервые проведено комплексное исследование процессов формирования микроструктуры и физико–химических свойств, композиционных покрытий на основе хрома структурированных графеном, а также КЭП из двойных Ni-Cu и Co-V сплавов, полученных методом электрохимического синтеза на подложке из стали AISI 304.

Разработан новый подход регулирования размеров кристаллов в бинарных Co-V системах основанный на вариации плотности тока и режимов формирования (стационарный, импульсный) многокомпонентных покрытий. По результатам исследований был разработан новый электролит и получен патент на полезную модель «Способ нанесения покрытий кобальт-ванадий» (патент РК № 11879 от 06.03.2026).

Впервые установлен механизм совместного осаждения никеля с медью и молибдена с ванадием в сплав и обосновано влияние состава электролитов и режимов осаждения на содержание компонентов, структуру, свойства и эффективность процесса электроосаждения покрытий Ni-Cu и Co-V.

На основе количественного анализа экспериментальных данных по кинетике окисления, а также по результатам испытаний физико-механических свойств (микротвердости и трибологии) предложена феноменологическая модель для описания формирования микроструктуры композиционных покрытий хром-графен.

Основные положения, выносимые на защиту

1 Морфология, микротвердость и содержание дисперсной фазы синтезированных электролитических покрытий хром-графен, определяется температурой осаждения, что проявляется в формировании нанокристаллической структуры (25-26 нм) при температуре осаждения 288-303 (±2) К, нанокристаллической (19 нм) при 318 (±2) К и трещиноватой и микропористой при 303 (±2) К.

2 В покрытиях, состоящих из двойных Ni-Cu сплавов управлять размерами кристаллов, текстурированностью зёрен и пористостью можно изменением плотности тока, и, таким образом, целенаправленно формировать нанокристаллическую и аморфно-кристаллическую структуру и оптимизировать механические свойства и коррозионную стойкость для заданных условий эксплуатации.

3 Коррозионно-электрохимические и механические характеристики покрытий из двойных Co-V сплавов зависят от режимов осаждения (стационарный, импульсный), а увеличение содержания тугоплавкого компонента обусловлено увеличением выхода по току и химическим восстановлением ванадия в период паузы при импульсном режиме формирования композиционные электролитические покрытия.

Научное и практическое значение исследования

Работа выполнялась в соответствии с проектом грантового финансирования МОН РК 2024-2026 гг. ИРН № AP 23484310 «Композиционные покрытия из бинарных, тернарных сплавов и гетерооксидных соединений с заданными функциональными свойствами» по приоритетному направлению «Энергия, передовые материалы и транспорт». Диссертация помогает развивать потенциал Казахстана в области материаловедения, исследуя электрохимические методы, которые являются масштабируемыми, экономичными и пригодными для интеграции в национальные отрасли.

Диссертация отражает приоритетные направления, изложенные в стратегических документах Государственной программы развития науки Республики Казахстан. Программа подчёркивает развитие материаловедения, создание новых материалов и внедрение передовых технологий как ключевые приоритеты. Настоящее исследование вносит прямой вклад в создание высокоэффективных защитных и функциональных покрытий, разработку энергоэффективных и экологически безопасных технологий модификации материалов и укрепление научной базы для индустриальных инноваций.

Надежность и достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается публикациями в национальных и международных рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором.

Личный вклад докторанта по каждой публикации

Личный вклад докторанта включает в себя определение целей и задач научно-исследовательской работы под руководством научных консультантов, проведение исследований, сотрудничество с коллегами, обработку и анализ результатов, формулирование выводов и написание статей.

Апробация диссертации

В рамках диссертационной работы и полученных на её основе результатов были опубликованы, представлены и обсуждены следующие материалы.

Статьи в базе данных Scopus

1 **Zellele D. M.,** Yar-Mukhamedova Gulmira Sh. and Rutkowska-Gorczyca M. A Review on Properties of Electrodeposited Nickel Composite Coatings: Ni-Al_2O_3, Ni-SiC, Ni- ZrO_2, Ni-TiO_2 and Ni-WC // MDPI Materials. -2024. -Vol. 17, No. 5715. https://doi.org/10.3390/ma17235715 (Q2, SJR = 0.614, Cite score = 6.4, IF = 3.5, Scopus percentile 79%)

2 Yar-Mukhamedova G. S., **Zellele D. M**., Rutkowska-Gorczyca M., Makhambet I., Mussabek G., Atchibayev R. & Kemelzhanova A. Advancements in Coating Methods and Properties of Titanium-Based Composite Coatings: A Review // ES Materials and Manufacturing. -2025. -Vol 28, No. 1569. https://dx.doi.org/10.30919/mm1569 (Q1, SJR = 0.62, IF = 5.3, Cite score = 12.7, Percentile = 98%)

3 **Zellele D. M**., Yar-Mukhamedova Gulmira Sh. and Rutkowska-Gorczyca M. Effect of Deposition Temperature on Morphology and Corrosion Resistance of Electrodeposited Chromium-Graphene Composite Coatings // ES Materials and Manufacturing. -2025. -Vol. 31, No. 1966. http://dx.doi.org/10.30919/mm1966 (Q1, SJR = 0.62, Cite score = 12.7, IF = 5.3, Percentile = 98%)

4 **Zellele D. M**., Yar-Mukhamedova Gulmira S. and Rutkowska-Gorczyca M. Effects and Applications of Additives in Nickel Electrodeposition: A Review // ES Materials and Manufacturing. -2026. -Vol. 31, No. 2080. http://dx.doi.org/10.30919/mm2080 (Q1, SJR = 0.62, IF = 5.3, Cite score = 12.7, Percentile = 98%)

Статьи в журналах, рекомендованных Национальным центром оценки научных и технических достижений (База данных цитирования Казахстана)

5 **Zelele D. M.,** & Rutkowska-Gorczyca M. Electrochemical synthesis and functional properties of metal and alloy-based composition coatings // Recent Contributions to Physics. -2024. -Vol. 88(1). -P. 41-48. https://doi.org/10.26577/RCPh.2024v88i1a06

6 Greshta V., Narivskiy O., Dzhus A., Vynar V., Yar-Mukhamedova G., Mukashev K., Beisen N., Musabek G., Imanbaeva A., **Zelele D.,** Atchibaev R., & Kemelzhanova A. Corrosion behavior of magnesium alloys NZ30K and NZ30K alloyed with silver in a model solution of the osteosynthesis process // Eurasian Physical Technical Journal. -2024. -Vol. 29. No. 3(49). -P. 29-36. https://doi.org/10.31489/2024No3/29-36

7 Nenastina T., Sakhnenko M., Oksak S., Yar-Mukhamedova G., **Zellele D**., Mussabek G., Imanbayeva A. Study of Complexation Patterns in the System Ni^{2+}, MoO_4^{2-}, $P_2O_7^{4-}$, Cit^{3-} for the Development of Poly-Ligand Electrolytes (Study of complexation patterns) // Eurasian Chemico-Technological Journal. -2024. -Vol. 26(3). -P. 155-160. https://doi.org/10.18321/ectj1638

8 Snizhnoi G., Pulina T., Solidor N., Yar-Mukhamedova G., Imanbayeva A., **Zellele D.,** & Mussabek G. Patterns and Mechanisms of Pitting of Heat Exchangers Made of AISI 321 and 08Kh18N10T Steels During their Operation in Recycled Eater // Eurasian Chemico-Technological Journal. -2025. -Vol. 27(4) -P. 305-313. https://doi.org/10.18321/ectj1677

9 Yar-Mukhamedova G., Sakhnenko N., Korogodskaya A., Stepanova I., Karakurkchi A., **Zellele D**., Imanbayeva A. Synthesis and properties of polyfunctional coatings on aluminum and titanium alloys // Physical Sciences and Technology. -2025. -Vol. 12(3-4). -P. 41-49. https://doi.org/10.26577/phst20251224

Материалы конференции, труды и постеры

10 **Zellele D.**, Electrodeposited iron-based composition coatings // Proceedings of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists “Farabi Alemi”. Almaty, Kazakhstan, 3-5 April 2025. P. 447, ISBN 978-601-04-7063-7

11 Makhambet I., **Zellele D**. Development of recommendations for corrosion-resistant nano-CEC applications // Proceedings of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists “Farabi Alemi”. Almaty, Kazakhstan, 3-5 April 2025. P. 448, ISBN 978-601-04-7063-7

12 **Zellele D**., Sakhnenko M., Nenastina T., Yar-Mukhamedova G. Electrolytic nickel alloys: Status and prospects // Proceedings of the XXXIII International Scientific-Practical Conference MicroCAD-2025. Kharkiv, Ukraine, –2025. –P. 1882. ISSN 2786-9253

13 **Zellele D**., Zhamanbayeva G., Kemelzhanova A., Atchibayev R., Kurmangaliyeva V. Microstructure, tribological and corrosion resistance properties of Ni composite coatings prepared via electrodeposition // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. –2025. –Vol. 6, No. 1. –P. 57–64. https://doi.org/10.5593/sgem2025/6.1/s23.08

14 **Zellele D M.,** Microstructural and corrosion resistance properties of electrodeposited chromium–graphene composite coatings under varying deposition temperatures // Materials of the XVI International Symposium on Combustion Plasma and Chemistry, Physics and Chemistry of Carbon and Nano Energetic Materials. Almaty, Kazakhstan, 1-3 October. -P. 181. ISBN 978-601-323-422-9

15 Yar-Mukhamedova G., Sakhnenko N., Karakurkchi A., Yermolenko I., Kemelzhanova A., **Zellele D.** Electrochemical and Mechanical Properties of Iron-Based Nanocomposites. In: Aikin, M., et al. Advanced and Novel Technologies - Interdisciplinary Collaboration in Materials Science. ANTICM Advances in Science, Technology & Innovation // Springer Cham. -2025. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_29

Монография

16 Яр-Мухамедова Г. Ш., Ведь М. В., Сахненко Н. Д., Степанова И. И., Желавская Ю. А., Корогодская А. Н., Мукашев К., Мурадов А. Д., **Зеллеле Д**. Функциональные покрытия сплавами и нанокомпозитами для экотехнологий: синтез и свойства: монография. Алматы: Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 2025. 110 с.

Патент

17 Patent 10580 Republic of Kazakhstan; Yar-Mukhamedova G., Sakhnenko N., Mukashev K., Imanbayeva A., **Zellele D.**, Nenastina T., Mussabek G., Pospelov A. Method for applying coatings with iron–cobalt–vanadium alloy, Filed 19.02.2025, Bulletin № 22.

18 Patent 11879 Republic of Kazakhstan; Yar-Mukhamedova G., Sakhnenko N., Imanbaeva A., Kemelzhanova A., Zellele D., Atchibayev R., Pospelov A., Zhelavskaya Y., Zyubanova S., Wang Y., Shen C. Method for depositing a cobalt-vanadium alloy coating, 06.03.2026, Bulletin № 9.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа включает в себя перечень символов и аббревиатур, введение, три главы (основная часть состоит из 3 разделов), заключение и список литературы. Работа представлена на 113 страницах, содержащих 52 рисунка, 16 таблиц и 216 библиографических ссылок.