

На правах рукописи



Батманова Татьяна Викторовна

**ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
ПОВЕДЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПОКРЫТИЙ В ЩЕЛОЧНЫХ И НЕЙТРАЛЬНЫХ СРЕДАХ**

1.4.4. Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена на кафедре аналитической и физической химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

Научный руководитель:

Бирюков Александр Игоревич, кандидат химических наук, доцент, проректор по научной работе, доцент кафедры аналитической и физической химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет».

Официальные оппоненты:

Бережная Александра Григорьевна, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой электрохимии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Южный федеральный университет" (г. Ростов-на-Дону).

Дорохов Андрей Валерьевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории хранения и защиты техники от коррозии федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (г. Тамбов).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 18.06.2025 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.437.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 1001

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243703-d-21229804/batmanova-tatyana-viktorovna>



Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба отправлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ЮУрГУ, Ученый совет университета. Тел.: +7(904)810-35-71, e-mail: sozykinsa@susu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Созыкин Сергей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследование процессов избирательной коррозии, сопровождающейся морфологическим развитием поверхности, а также процессами фазообразования, является актуальной научно-практической задачей. Это обусловлено как ужесточением условий эксплуатации покрытий и высокими требованиями к их декоративным, механическим и антикоррозионным свойствам, так и разработкой новых покрытий, имеющих сложный химический и фазовый состав. В особенности это касается различных интерметаллических систем, составляющих основу многих антикоррозионных покрытий.

Покрытия на основе интерметаллидов цинка являются традиционным и эффективным способом антикоррозионной защиты стальных изделий. В то же время, в современной литературе механизм коррозии интерметаллических цинковых покрытий часто интерпретируют на основе сложившихся представлений о механизме коррозии чистого цинка без учета как селективного растворения, так и влияния легирующего элемента, что делает задачу исследования механизма коррозии таких систем актуальной и практически значимой.

Применение коррозионных процессов и селективного растворения сплавов к созданию новых материалов - динамично развивающаяся область электрохимической науки. С помощью селективного растворения получают перспективные морфологически развитые материалы с электрохимически активной поверхностью. Прекурсорами таких материалов могут выступать интерметаллические цинковые покрытия. Установление механизма селективного растворения, а также физико-химические исследования продуктов растворения интерметаллических систем, позволяют эффективно управлять процессом и получать материалы с заданными свойствами.

Помимо селективного растворения на коррозию сплавов оказывает влияние состав, морфология и структура, так называемого, слоя продуктов коррозии. Часто именно слою продуктов коррозии приписывают повышение коррозионной стойкости цинковых покрытий. Известно, что помимо оксида (ZnO) и гидроксида цинка ($Zn(OH)_2$), в зависимости от химического состава коррозионной среды слой продуктов коррозии может включать различные основные соли цинка, имеющие сложную слоистую структуру. Физико-химический состав продуктов коррозии цинка широко изучался при воздействии атмосферы различных регионов и климатических зон. Относительно низкая скорость коррозии в данных условиях часто не позволяет учесть накопление легирующего компонента на поверхности сплава и его влияние на физико-химические свойства защитного слоя и коррозионную стойкость покрытий. В научно-технической литературе не разработана модель влияния легирующих элементов на физико-химическую природу продуктов коррозии и дальнейшее коррозионно-электрохимическое поведение.

Цель работы – определение механизма коррозии диффузионных интерметаллических цинковых покрытий, а также физико-химической природы продуктов коррозии в щелочных и нейтральных средах.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Получить серии диффузионных интерметаллических покрытий FeZn и NiZn, изучить их фазовый и химический состав.
2. Исследовать коррозионно-электрохимическое поведение покрытий FeZn и NiZn в щелочных и нейтральных растворах.
3. Исследовать физико-химический состав, структуру, морфологию продуктов коррозии, а также их влияние на коррозию покрытий.
4. Оценить перспективность применения гальванодиффузионных покрытий FeNiZn для защиты от коррозии.

Научная новизна

Впервые получены антикоррозионные покрытия на основе γ -фазы Ni₂Zn₁₁ комбинированием электроосаждения и диффузионного цинкования.

Показано, что при выщелачивании покрытий FeZn и NiZn важную роль играют гальванические эффекты, а продуктами выщелачивания являются твердые растворы Me(Zn) (где Me – это Fe или Ni), устойчивые при комнатной температуре в условиях свободной коррозии.

Показано различие в фазовом составе продуктов коррозии покрытий FeZn и NiZn, отмечается роль химической природы легирующего компонента в формировании и эволюции слоистых гидроксосоединений цинка.

Полученные результаты могут быть использованы для развития представлений о селективной коррозии сплавов на основе неблагородных металлов в условиях образования неравновесного коррозионного фазового слоя на поверхности.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Практическая значимость работы состоит в определении коррозионного поведения при значительном разрушении и длительной эксплуатации диффузионных интерметаллических покрытий FeZn и NiZn, а также в разработке перспективных гальванодиффузионных антикоррозионных покрытий, сочетающих в себе преимущества как покрытий FeZn, так и NiZn.

Методология и методы исследования

Исследуемые покрытия получали способом диффузионного цинкования в порошках цинка с модифицированной поверхностью частиц. Способ нанесения покрытий заключается в нагреве металлических подложек в порошках цинка, частицы которого покрыты наноструктурированным оксидом цинка.

Для исследования химического и фазового состава покрытий использовали рентгенофлуоресцентную спектроскопию и рентгенофазовый анализ, соответственно. Морфологию поверхности покрытий до и после коррозионных

испытаний, а также металлографические шлифы покрытий исследовали при помощи растровой электронной микроскопии.

Для изучения коррозионно-электрохимического поведения покрытий использовали потенциометрические и потенциодинамические измерения. Скорость коррозии определяли с помощью гравиметрии. Химический состав растворов до и после коррозии покрытий устанавливали атомно-абсорбционной спектрометрией.

Для идентификации продуктов коррозии применяли рентгенофазовый анализ, ИК-Фурье спектроскопию и рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности коррозии диффузионных интерметаллических покрытий FeZn и NiZn на основе δ - и γ -фаз соответственно, с учетом влияния толщины и химического состава покрытий на скорость коррозии.
2. Эволюция морфологии и физико-химического состава поверхности покрытий FeZn и NiZn при коррозии в щелочных и нейтральных растворах.
3. Особенности физико-химической природы слоистых гидроксосолей цинка в составе продуктов коррозии покрытий FeZn и NiZn.
4. Новый способ получения покрытий NiZn и FeNiZn диффузионным цинкованием.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов исследования обеспечена использованием комплекса аттестованных высокоточных современных приборов и взаимодополняющих физико-химических методов исследования состава, структуры, морфологии и свойств материалов, коррозионно-электрохимического поведения, а также соответствием результатов, полученных с помощью различных методов.

Апробация работы. Результаты исследований представлены на следующих конференциях: IX Всероссийская (с международным участием) научная конференция «Современные методы прикладной электрохимии» (Иваново, 2017); Всероссийская молодежная конференция «Достижения молодых ученых: химические науки» (Уфа, 2018); Всероссийская конференция с международным участием «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах – ФАГРАН» (Воронеж, 2018, 2021); Российская молодежная научная конференция с международным участием «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» (Екатеринбург, 2019, 2021, 2022); XXII Всероссийская конференция молодых ученых-химиков с международным участием (Нижний Новгород, 2019); II International conference «Corrosion and new materials, technologies in the oil & gas industry» – Corrosion Oil&Gas (Санкт-Петербург, 2021); XXIV Международная научно-практическая конференция «ТРУБЫ – 2021» (Челябинск, 2021); XXIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» (Томск, 2022); XIX Российская конференция «Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов» (Екатеринбург, 2023); II Всероссийская научная

конференция с международным участием «Ресурсосберегающие и экологобезопасные процессы в химии и химической технологии» (Пермь, 2023); Всероссийская конференция «Электрохимия и коррозия металлов и сплавов» (Воронеж, 2023).

Исследования по теме работы были поддержаны грантом РФФИ № 20-43-740026 «Эволюция структурно-фазового состава и морфологии поверхности при анодном растворении гетерофазных интерметаллических пленок» (исполнитель); грантом Фонда поддержки молодых ученых ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» «Влияние химического и фазового состава интерметаллических покрытий на образование продуктов коррозии в средах различного состава» в 2023 г. (руководитель).

Личный вклад автора заключался в подборе, изучении и анализе литературных данных, изготовлении и подготовке образцов покрытий, проведении исследований электрохимическими и физическими методами анализа, обработке экспериментальных данных. Обсуждение и обобщение полученных результатов выполнены автором совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 23 публикациях, в том числе 6 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus, 16 статьях в сборниках материалов конференций и тезисах докладов на международных и всероссийских конференциях. Результаты исследований обобщены в виде главы в коллективной монографии по актуальным вопросам электрохимии сплавов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы (глава 1), материалов и методов исследования (глава 2), описания полученных результатов (глава 3), заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 143 страницы машинописного текста, включая 12 таблиц и 41 рисунок. Библиографический список содержит 170 наименований.

Благодарности. Автор диссертации выражает признательность научному руководителю к.х.н. Бирюкову А. И. за постановку задач, помощь в обсуждении результатов и всестороннюю поддержку; благодарность к.т.н. Галину Р. Г. – автору методики диффузионного цинкования за помощь в получении образцов покрытий; к.х.н. Белой Е. А. за ценные комментарии при интерпретации результатов; сотрудникам НОЦ «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ); Научного парка ФГБОУ ВО «СПбГУ»; физического факультета ФГБОУ ВО «ЧелГУ» за помощь в проведении отдельных экспериментов и в обсуждении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, описаны научная новизна, теоретическая и

практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о личном вкладе автора и структура диссертационной работы.

В **первой главе** представлены результаты анализа литературных данных, посвященных способам получения покрытий и коррозионному поведению цинковых покрытий. С помощью традиционных способов получают преимущественно или покрытия, состоящие из «чистого» цинка, или гетерофазные покрытия, включающие в себя различные интерметаллические фазы и твердые растворы. Таким образом отличается интерпретация механизма коррозии покрытий – в большей степени механизм коррозии цинковых покрытий описывают, основываясь на коррозии цинка. В некоторых случаях учитывают вклад интерметаллических фаз и твердых растворов цинка в коррозионное поведение покрытий, рассматривая избирательную коррозию и взаимное влияние фаз. При этом, в литературе слабо представлена информация об изучении коррозионных свойств индивидуальных интерметаллических фаз.

В литературе описан физико-химический состав продуктов коррозии цинка и цинковых покрытий при атмосферной коррозии. Показано, что продукты коррозии цинка имеют сложную фазовую природу, помимо оксида и/или гидроксида цинка образуются основные соли со слоистой структурой. В интерпретации механизма коррозии цинка и покрытий на его основе, физико-химические свойства продуктов коррозии играют важную роль. В тоже время, имеется мало сведений о влиянии легирующего элемента цинковых покрытий на физико-химические свойства продуктов коррозии и, как следствие, на механизм коррозии.

Обзор литературных данных позволил определить перспективный метод нанесения покрытий, определить наилучшие физико-химические методы исследования как коррозионного поведения, так и структуры, и состава продуктов коррозии, сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлена методика получения покрытий, описаны методы и условия проведения экспериментов; указано используемое оборудование.

Физико-химические методы исследования. Химический состав покрытий определяли при помощи энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра *ARL QUANT'X*. Морфологию поверхности покрытий до и после коррозионных испытаний изучали на сканирующем электронном микроскопе *Jeol JSM-7001F*. Элементный анализ проводили при помощи энергодисперсионного элементного анализатора частиц *EDS Oxford Instruments*. Рентгенофазовый анализ покрытий и продуктов коррозии проводили на рентгеновских дифрактометрах *Bruker D8 Advance* и *Rigaku Ultima IV* (НОЦ «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ»). Продукты коррозии покрытий изучали при помощи ИК-спектрометра с Фурье-преобразованием *Shimadzu IRAffinity-1S*. Рентгеновские фотоэлектронные спектры продуктов коррозии, получали на комплексном фотоэлектронном и растровом оже-электронном спектрометре *Escalab 250Xi (Thermo Fisher Scientific)* с полусферическим электронным анализатором *PHOIBOS 150 (Specs GmbH)*

(Научный парк ФГБОУ ВО «СПбГУ»). Химический анализ растворов проводили атомно-абсорбционным методом на спектрометре *КВАНТ-2А* с пламенным атомизатором.

Коррозионно-электрохимические методы исследования. Определение скорости коррозии проводили в водных растворах NaCl с концентрацией 3 масс. %, и в растворах NaOH с концентрацией 2 моль/л и 5 моль/л. При исследовании коррозии покрытий в щелочной среде выдержка составляла от 1 мин до 18 ч. В растворе 3 масс. % NaCl выдержка составляла от 1 дня до 6 месяцев. Эксперименты проводили при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ в условиях естественной аэрации. Скорость коррозии (в $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$) и долю травления (в %) рассчитывали по результатам потери массы. Электродные потенциалы покрытий и поляризационные кривые измеряли при помощи потенциостата-гальваностата *P-30J (Elins)*, используя прижимные ячейки из полипропилена для плоских образцов. В качестве электрода сравнения использовали хлоридсеребряный электрод, в качестве вспомогательного – графитовый.

Диффузионные покрытия. Методом диффузионного цинкования в порошках цинка с модифицированной поверхностью частиц получены покрытия FeZn и NiZn. Толщина покрытий возрастает при увеличении времени цинкования, как и концентрация цинка в поверхностных слоях покрытий. При времени цинкования от 1 до 4 часов толщина покрытий FeZn составляет от 13 ± 4 до 88 ± 9 мкм; толщина покрытий NiZn изменяется от 12 ± 4 до 72 ± 4 мкм. Покрытия FeZn имеют концентрацию цинка в поверхностных слоях от 89,0 до 92,5 масс. %, а NiZn – от 84,0 до 88,0 масс. % в зависимости от толщины. Покрытия состоят из FeZn и NiZn интерметаллических фаз, атомная доля цинка в которых увеличивается в соответствии с диаграммой состояния системы по мере удаления от подложки. Фазовый состав покрытий FeZn с толщиной от 10 до 80 мкм представлен преимущественно δ -фазой FeZn₇₋₁₀, а покрытий NiZn той же толщины – γ -фазой Ni₂Zn₁₁ (рис. 1).

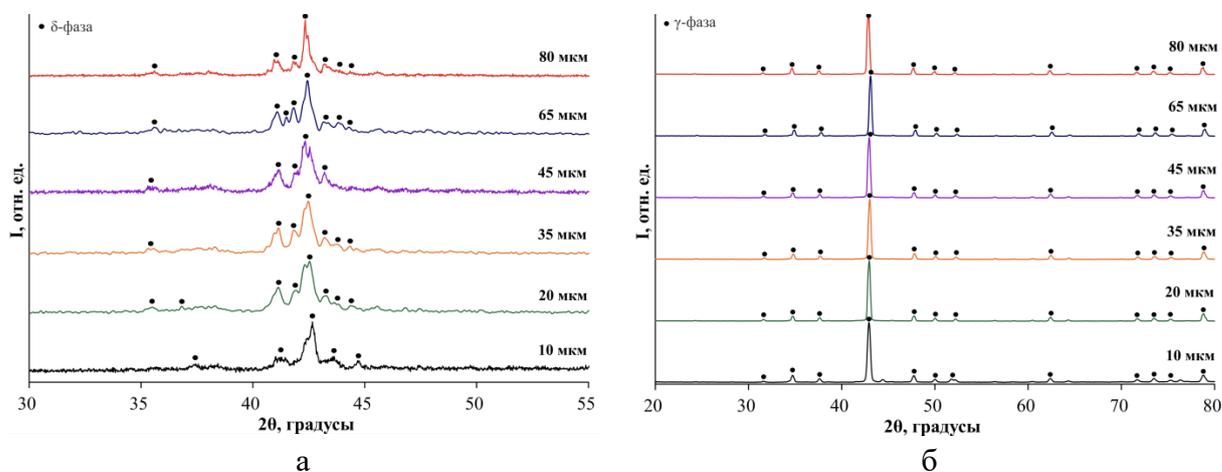


Рис. 1 – Дифрактограммы покрытий FeZn (а) и NiZn (б) различной толщины

Третья глава посвящена изучению коррозионного поведения покрытий в щелочной и нейтральной средах.

В **разделе 3.1** представлены результаты исследования коррозионно-электрохимического поведения ДЦ покрытий в щелочном растворе. Коррозия покрытий FeZn и NiZn сопровождается селективным растворением цинка из фаз покрытия, что подтверждается результатами химического анализа растворов после коррозии. На кинетических кривых растворения покрытий и зависимостях электродного потенциала от времени (рис. 2) можно выделить три участка.

На рис. 2 представлены зависимости электродного потенциала покрытий разной толщины от времени в 5 М NaOH.

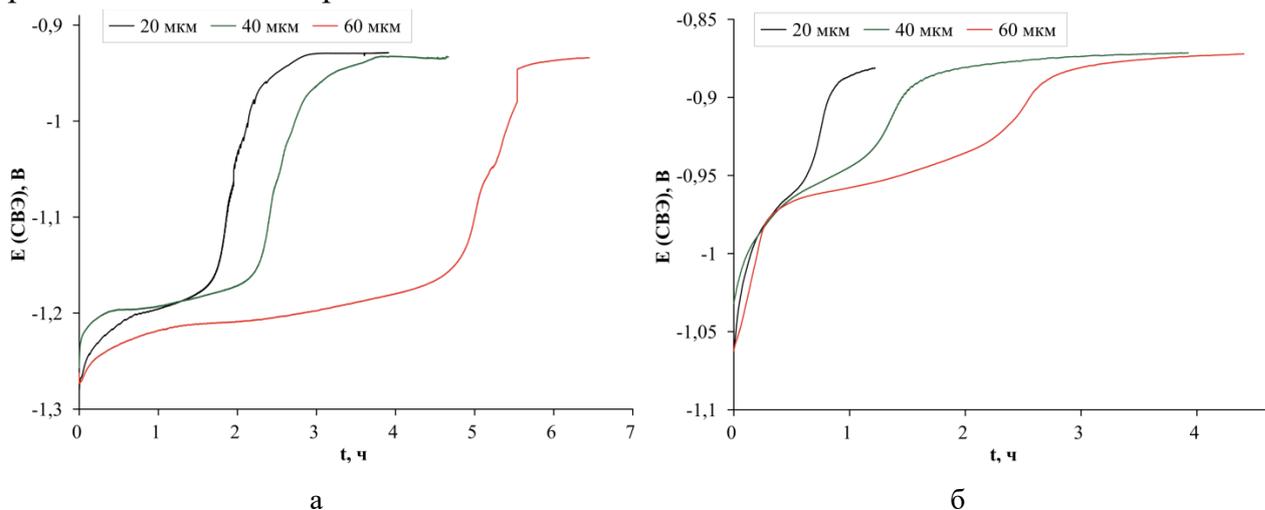


Рис. 2 – Электродные потенциалы покрытий FeZn (а) и NiZn (б) различной толщины в 5 М NaOH

На начальном этапе скорость коррозии покрытий низкая, при этом электродный потенциал смещается в положительную область. Продолжительность первого этапа у покрытий FeZn составляет от 1 до 2 часов, а у покрытий NiZn от 5 до 15 мин. Поверхность покрытий становится неоднородной, происходит зарождение трещин. Затем скорость коррозии увеличивается, а электродный потенциал покрытий принимает постоянное значение. Протяженность второго этапа коррозии покрытий FeZn больше в 3 – 4 раза, чем у покрытий NiZn и пропорциональна толщине. Увеличение скорости коррозии связано с ростом трещин в покрытиях и развитием морфологии поверхности. Трещины и другие дефекты приводят к появлению трехмерного фронта растворения за счет транспорта коррозионной среды к нижележащим слоям покрытий. Возникают гальванические пары между фазами с разными коррозионными потенциалами, что также усиливает локализацию коррозионного процесса и увеличивает его скорость. Повторное облагораживание потенциала на завершающих стадиях коррозии связано со значительным вытравливанием цинка.

На рис. 3 представлены электронно-микроскопические изображения поверхности покрытий после коррозии. Видно, что поверхность покрытий неоднородная, наблюдаются поры, микротрещины и другие дефекты. При этом поверхность покрытий NiZn более зернистая, поры практически отсутствуют, а у

покрытий FeZn – губчатая с большим количеством пор. Концентрация цинка после коррозии значительно уменьшается: у покрытий FeZn с 90,0 до 27,0 ат. %, а у покрытий NiZn с 85,2 до 25,1 ат. %, что также свидетельствует о селективном характере коррозии покрытий.

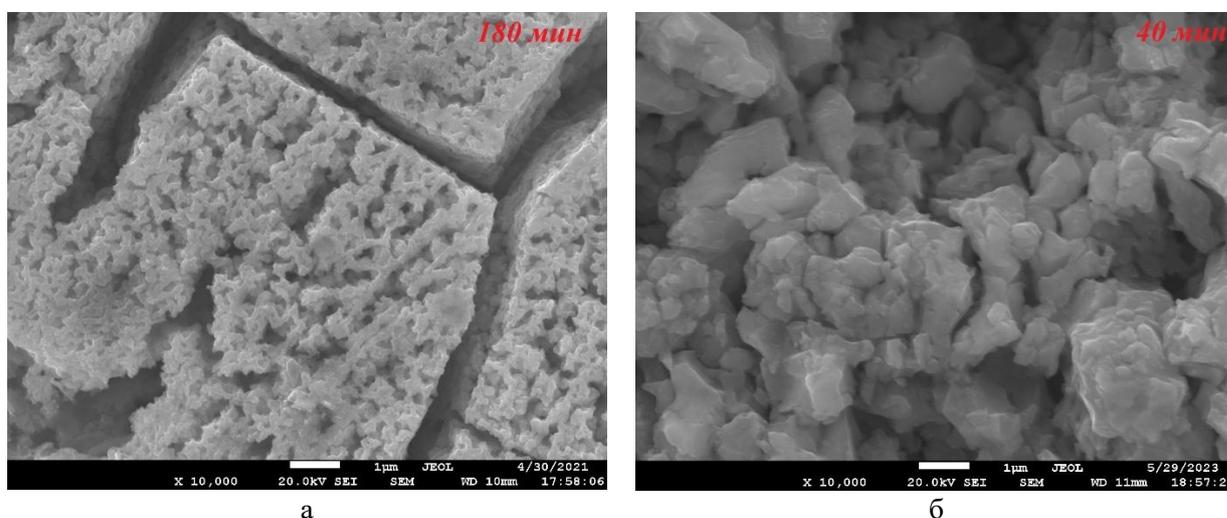


Рис. 3– Электронно-микроскопические изображения поверхности покрытий FeZn (а) и NiZn (б) толщиной 20-25 мкм после коррозии в 5 М NaOH

Согласно результатам рентгенофазового анализа на начальных этапах коррозии фазовый состав покрытий FeZn и NiZn не изменяется (рис. 4). Продуктом коррозии в щелочи являются твердые растворы цинка в железе ($\alpha\text{-Fe}^*$) и никеле ($\alpha\text{-Ni}^*$). Таким образом селективное растворение цинка из фазы покрытий сопровождается фазовым превращением δ - и γ -фаз в твердые растворы.

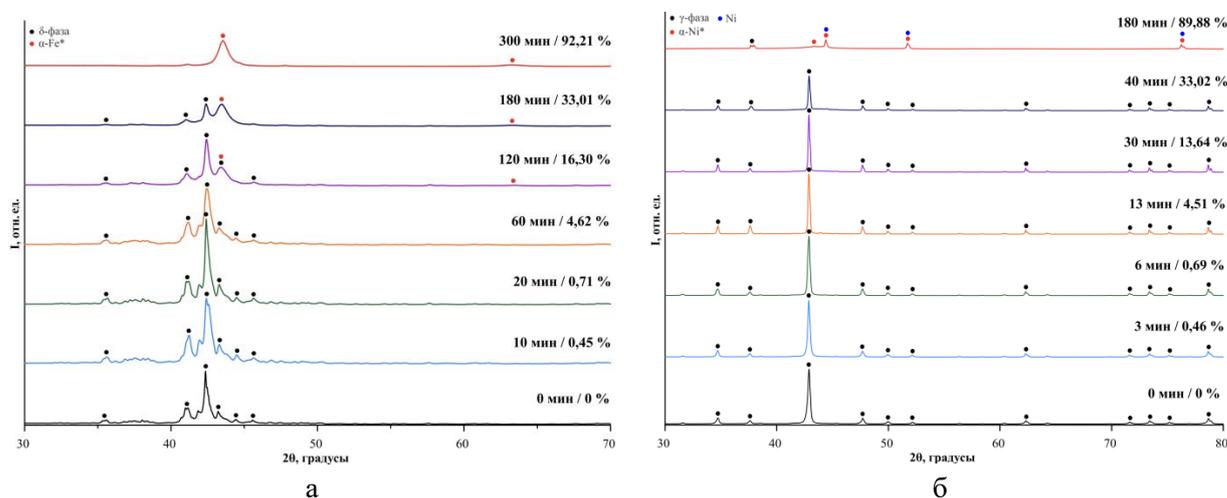


Рис. 4 – Дифрактограммы покрытий FeZn (а) и NiZn (б) толщиной 30 мкм после травления в растворе 5 М NaOH (указано время травления и доля стравленного покрытия)

В разделе 3.2 приведены результаты исследования коррозионно-электрохимического поведения ДЦ покрытий в 3 масс. % NaCl. Электродные потенциалы и плотности тока коррозии покрытий FeZn и NiZn при выдержке до 28 дней представлены в табл. 1.

Электродный потенциал покрытий NiZn положительнее, электродного потенциала FeZn на 200 мВ (до экспозиции) и на 150 мВ (через 28 дней). С увеличением экспозиции электродные потенциалы покрытий FeZn и NiZn монотонно смещаются в положительную область. Плотность тока коррозии покрытий NiZn и FeZn одинаковая до экспозиции, но через 28 дней плотность тока коррозии у покрытий FeZn в 3 – 4 раза больше, чем у покрытий NiZn. Зависимость плотности тока от времени имеет экстремальный характер, максимальное значение плотности тока коррозии покрытий FeZn наблюдается через 7 суток экспозиции, а NiZn – через 3 суток. Особенности изменения электродных потенциалов покрытий и тока коррозии можно связать с обесцинкиванием поверхности покрытий, а также с образованием продуктов коррозии, проявляющих защитный эффект.

Таблица 1 – Электродные потенциалы и плотности тока коррозии ДЦ покрытий

Образец/время выдержки, сутки	– E (СВЭ), мВ / $i_{\text{корр}} \cdot 10^{-2}$, мА/см ²					
	0	1	3	7	14	28
FeZn 25 мкм	705 / 4,9	676 / 31,2	657 / 36,6	581 / 43,5	551 / 24,9	454 / 20,5
FeZn 35 мкм	721 / 5,9	690 / 22,6	681 / 41,5	613 / 39,3	595 / 28,2	537 / 20,0
FeZn 60 мкм	731 / 7,9	722 / 22,7	675 / 21,4	624 / 30,1	583 / 26,2	507 / 22,3
NiZn 30 мкм	495 / 2,8	493 / 2,9	427 / 6,5	360 / 6,7	354 / 5,9	356 / 5,5
NiZn 45 мкм	504 / 5,4	490 / 5,6	396 / 7,4	388 / 3,6	363 / 3,9	362 / 6,2
NiZn 60 мкм	500 / 5,9	483 / 0,9	431 / 5,6	369 / 3,5	371 / 5,8	359 / 5,0

Влияние продуктов коррозии на электрохимическое поведение покрытий в 3 масс. % NaCl изучали при длительной выдержке (до 6 месяцев). Исследование проводили с покрытиями толщиной ~ 40 мкм. Электрохимические параметры определяли до и после удаления слоя продуктов коррозии на поверхности. На поляризационных кривых покрытий с продуктами коррозии и с поверхности, очищенной от продуктов коррозии (рис. 5), видны различия, как в положении анодных ветвей, так и в плотности тока коррозии.

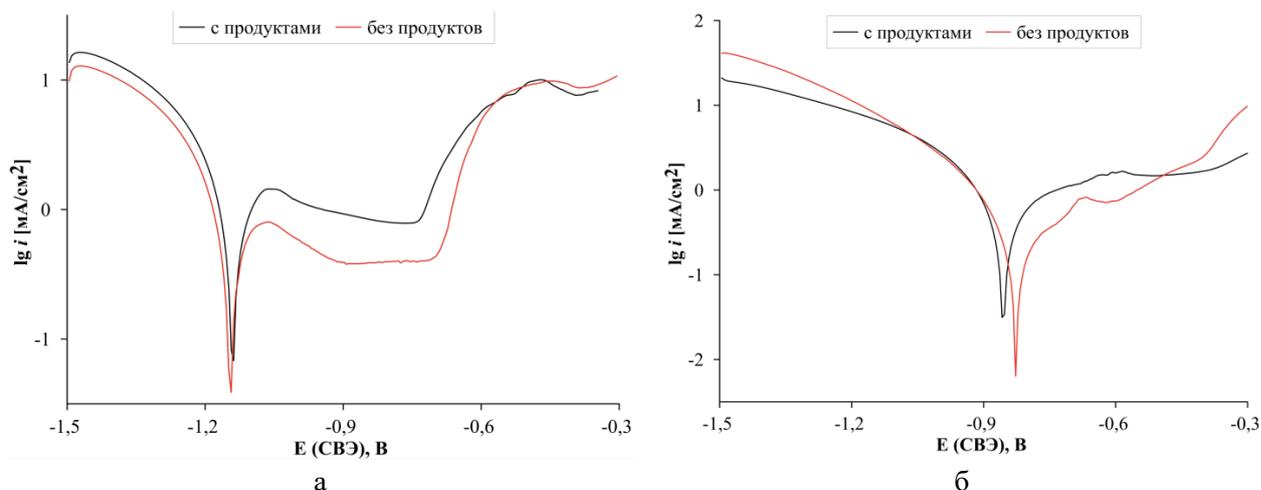


Рис. 5 – Поляризационные кривые покрытий FeZn (а) и NiZn (б) толщиной 40 мкм до и после счистки продуктов коррозии после 1 месяца выдержки

В таблице 2 представлены электродные потенциалы и плотности тока коррозии покрытий при выдержке от 1 до 6 месяцев с продуктами коррозии и без них.

Таблица 2 – Значения электродных потенциалов и плотности тока коррозии ДЦ покрытий при выдержке 1 – 6 месяцев

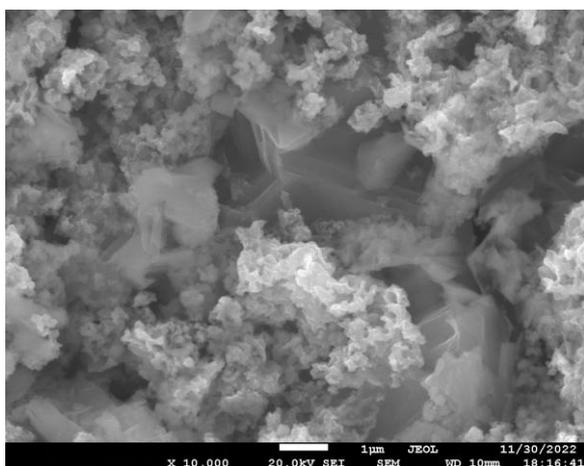
Образец/время выдержки, мес		– E (СВЭ), мВ / $i_{\text{corr}} \cdot 10^{-2}$, мА/см ²			
		1	2	3	6
FeZn	с продуктами коррозии	531 / 35,2	456 / 32,4	376 / 30,6	388 / 25,5
	без продуктов коррозии	575 / 20,4	600 / 47,1	540 / 71,5	670 / 73,7
NiZn	с продуктами коррозии	414 / 15,0	350 / 3,4	375 / 7,7	373 / 15,9
	без продуктов коррозии	454 / 7,9	392 / 7,1	437 / 6,5	425 / 14,0

При увеличении времени выдержки в коррозионной среде от 1 до 6 месяцев электродный потенциал покрытий становится положительнее. Через 1 – 2 месяца выдержки потенциалы покрытий FeZn и NiZn с продуктами коррозии отличаются на 100 мВ, а через 3 – 6 месяцев имеют практически одинаковое значение. Удаление продуктов коррозии приводит к смещению потенциала покрытий в отрицательную сторону.

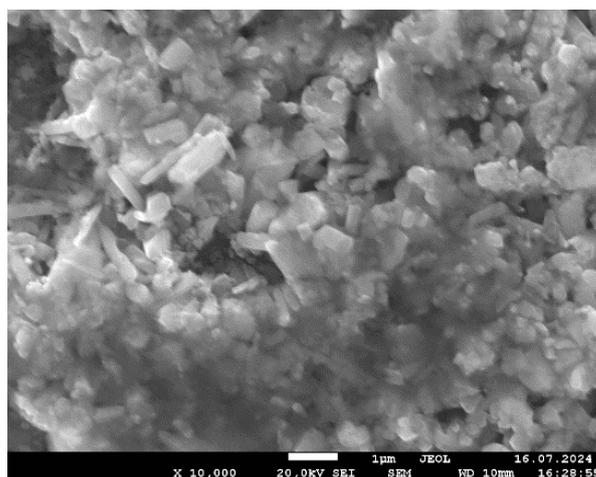
Ток коррозии покрытий FeZn снижается в 1,5 раза с увеличением времени выдержки при наличии на поверхности покрытия слоя продуктов коррозии. В тоже время, удаление пленки продуктов коррозии приводит к росту тока в 3,5 раза. У покрытий NiZn с продуктами коррозии при увеличении времени экспозиции ток коррозии изменяется немонотонно, минимум наблюдается через 2 месяца выдержки. Удаление продуктов коррозии не всегда приводит к увеличению тока.

Раздел 3.3 посвящен изучению продуктов коррозии ДЦ покрытий в 3 масс. % NaCl при экспозиции от 1 до 6 месяцев.

На рис. 6 представлены электронно-микроскопические изображения поверхности покрытий после выдержки в 3 масс. % NaCl в течение 6 месяцев и удаления пленки продуктов коррозии. Поверхность покрытий неоднородная, с губчатым рельефом и локальными коррозионными поражениями в виде язв, в которых наблюдаются кристаллические продукты коррозии. Продукты коррозии NiZn покрытий имеют вид шестигранных кристаллов, в то время как для покрытий FeZn они представлены в виде рыхлых скоплений без четкой огранки.



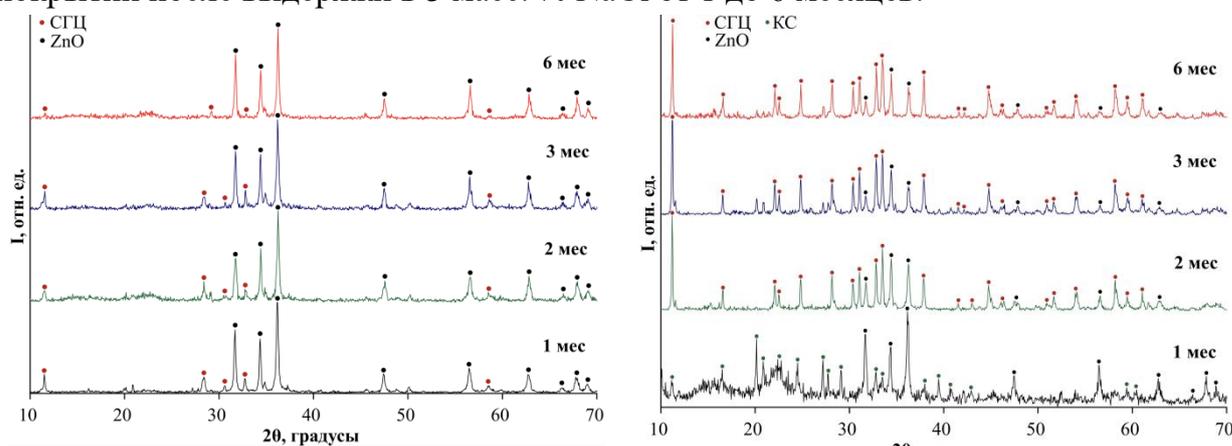
а



б

Рис. 6 – Электронно-микроскопические изображения поверхности покрытий FeZn (а) и NiZn (б) после выдержки в 3 масс. % NaCl в течение 6 месяцев

На рис. 7 представлены порошковые рентгенограммы продуктов коррозии покрытий после выдержки в 3 масс. % NaCl от 1 до 6 месяцев.



а

б

Рис. 7 – Дифрактограммы продуктов коррозии покрытий FeZn (а) и NiZn (б) при времени экспозиции 1 – 6 месяцев в 3 масс. % NaCl

На всех дифрактограммах продуктов коррозии покрытий FeZn и NiZn присутствуют максимумы, отвечающие оксиду цинка ZnO. Помимо рефлексов ZnO, наблюдается максимум в диапазоне брегговских углов $11,2 - 11,5^\circ$. Его положение близко к положению наиболее интенсивных максимумов слоистых гидроксидов цинка (СГЦ), часто встречающихся в продуктах коррозии цинковых покрытий. Этой структуре могут отвечать основной хлорид цинка $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$, основной карбонат цинка $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ и др. Из положения максимума $2\theta \sim 11,2 - 11,5^\circ$ рассчитали межплоскостные расстояния и сравнили их с межслоевыми расстояниями для представителей семейства продуктов коррозии цинка и цинковых покрытий (табл. 3).

Таблица 3 – Межплоскостные расстояния, соответствующие максимуму при $2\theta \sim 11,2 - 11,5^\circ$ на рентгенограммах продуктов коррозии покрытий и слоистым гидроксидом цинка

Образец, время выдержки	d, Å	
	FeZn ($2\theta \sim 11,5^\circ$)	NiZn ($2\theta \sim 11,2^\circ$)
1 мес	7,67	-
2 мес	7,68	7,90
3 мес	7,66	7,87
6 мес	7,66	7,86
$Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$	7,88	
$Zn_5(OH)_{10} \cdot 2H_2O$	7,53	
$Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$	6,86	

Межплоскостное расстояние СГЦ у покрытий FeZn и NiZn отличается. У продуктов коррозии покрытий FeZn межплоскостное расстояние СГЦ находится между межслоевыми расстояниями для $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ и дигидрата гидроксида цинка ($Zn_5(OH)_{10} \cdot 2H_2O$). Малая интенсивность остальных рефлексов СГЦ может быть обусловлена разупорядоченностью слоев. По-видимому, продуктом коррозии покрытий FeZn является структура, содержащая разупорядоченные слои на основе соединений цинка, в межслоевом пространстве находятся Cl- и OH-группы.

На дифрактограммах продуктов коррозии покрытий NiZn через 1 месяц выдержки не наблюдается рефлексов, соответствующих СГЦ. Набор рефлексов, присутствующих на дифрактограмме, принадлежит комплексной соли с формулой $[Zn(H_2O)_6] \cdot [ZnCl_4] \cdot 3H_2O$. У продуктов коррозии покрытий NiZn через 2 – 6 месяцев выдержки межплоскостное расстояние СГЦ соответствует межслоевому расстоянию $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$. Кроме того, на дифрактограммах продуктов коррозии NiZn присутствует полный набор рефлексов, отвечающих структуре основного хлорида цинка. Рефлексов, которые относились бы к продуктам коррозии железа или никеля не наблюдается на всех дифрактограммах.

На рис. 8 представлены инфракрасные спектры продуктов коррозии FeZn и NiZn покрытий, после выдержки в 3 масс. % NaCl от 1 до 6 месяцев.

Полоса поглощения $3600 - 3200 \text{ см}^{-1}$ относится к валентным колебаниям OH^- . На спектрах продуктов NiZn пиковая частота составляет 3494 см^{-1} . Данную полосу поглощения относят к основному хлориду цинка. У покрытий FeZn через 1 месяц выдержки пиковая частота составляет 3396 см^{-1} , что характерно для $Zn(OH)_2$. Однако с увеличением экспозиции пиковая частота смещается на 100 см^{-1} и принимает значение, характерное для основного хлорида цинка.

Полоса поглощения в области $1625 - 1555 \text{ см}^{-1}$ присутствует на спектрах продуктов коррозии обоих покрытий и соответствует деформационным колебаниям OH^- . Данную полосу поглощения относят либо к основному хлориду цинка, либо к деформационным колебаниям H_2O в межслоевом пространстве гидроксолей цинка.

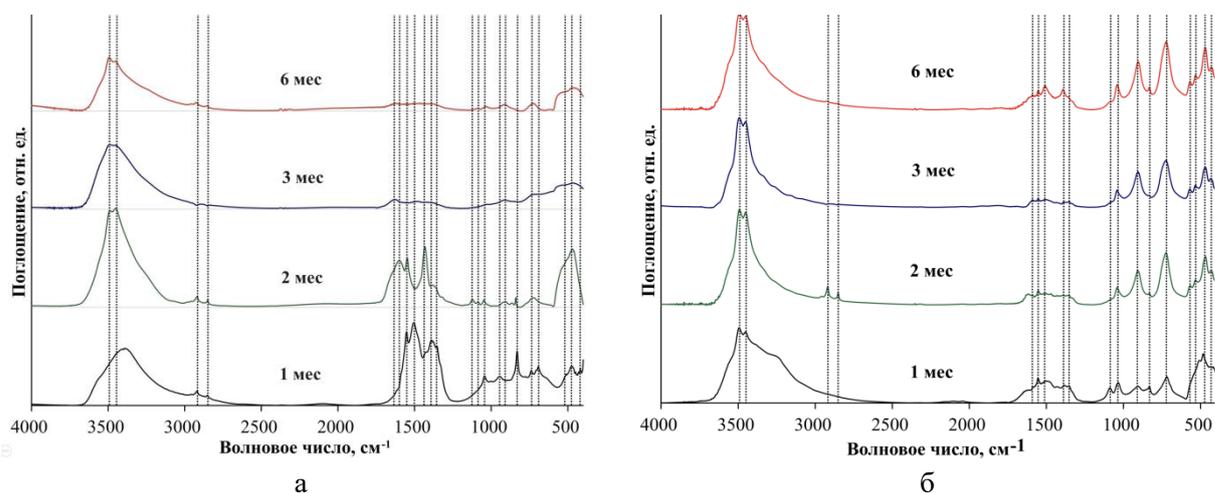


Рис. 8 – ИК-Фурье спектры продуктов коррозии покрытий FeZn (а) и NiZn (б) при времени экспозиции 1 – 6 месяцев в 3 масс. % NaCl

Полосу поглощения в области $1547 - 1382 \text{ см}^{-1}$ относят к колебаниям связи C-O в основном карбонате цинка. Эта полоса также наблюдается на спектрах продуктов коррозии и FeZn, и NiZn, но становится менее выражена при увеличении экспозиции. Полосы поглощения в интервале от 1100 до 600 см^{-1} относят к колебаниям связей Zn-O-H и Zn – Cl в основном хлориде цинка. У продуктов коррозии FeZn полосы поглощения в данной области наблюдаются только при выдержке 1 и 2 месяца, а далее происходит ее погашение. В отличие от FeZn у продуктов коррозии NiZn данные полосы наблюдаются на всех спектрах.

В области $600 - 350 \text{ см}^{-1}$ присутствуют колебательные моды связи Zn-O в оксиде ZnO.

На рис. 9 представлены РФЭ спектры Zn2p в продуктах коррозии ДЦ покрытий FeZn и NiZn после выдержки в 3 масс. % NaCl в течение 1 – 6 месяцев. Далее в тексте, номер спектра помещается в скобки и соответствует количеству месяцев экспозиции покрытия в коррозионной среде. Идентификация химического состояния с помощью РФЭС на основе основной линии Zn $2p_{3/2}$ осложнена из-за небольшого сдвига энергии связи между Zn^0 , ZnO, $\text{Zn}(\text{OH})_2$, $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ или $\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$, особенно когда они присутствуют одновременно.

На спектрах цинка Zn2p(1) (рис. 9, а) и Zn2p(2) для продуктов коррозии покрытий FeZn наблюдается уширенная по сравнению с спектрами Zn2p(3) и Zn2p(6) (рис. 9, в) линия. Они могут быть разложены на две составляющие, относящиеся к оксиду цинка и гидроксиду цинка/слоистым гидроксосолям цинка соответственно. Спектры Zn2p(3) и Zn2p(6) имеют одну составляющую, которая может быть отнесена к ZnO.

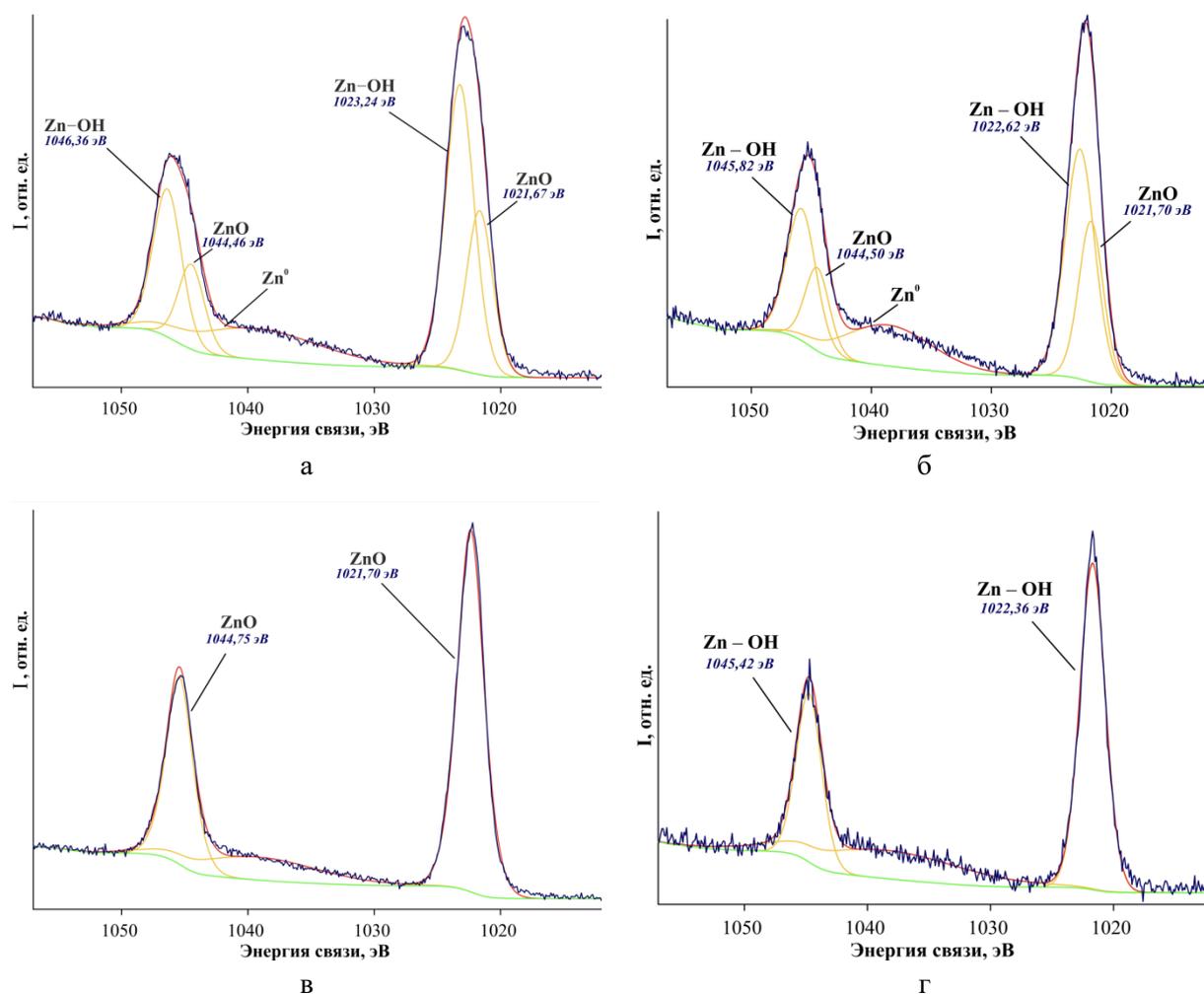


Рис. 9 – Разложение фотоэлектронного спектра Zn2p в продуктах коррозии покрытий FeZn (а, в) и NiZn (б, г) после 1 и 6 месяцев выдержки в 3 масс. % NaCl

Спектр цинка Zn2p(1) в продуктах коррозии покрытий NiZn (рис. 9, б) разложен на две составляющие, относящиеся к оксиду цинка и гидроксиду цинка/слоистым гидроксосолям цинка соответственно. Спектры Zn2p(2 – б) имеют одну составляющую (рис. 9, г), которая может быть отнесена к гидроксиду цинка/слоистым гидроксосолям цинка.

На рис. 10 представлены РФЭ спектры Fe2p и Ni2p в продуктах коррозии ДЦ покрытий FeZn и NiZn (соответственно) после выдержки в 3 масс. % NaCl в течение 1 – 6 месяцев.

Поскольку все 3d-металлы достаточно сложно анализировать, при интерпретации спектров опирались на наличие и положение сателлитов. На интенсивность сателлитов оказывают влияние несколько факторов: окружение элемента, неоднородность поверхности продуктов коррозии и концентрация элемента.

Для спектров Fe2p(2) и Ni2p(2) характерно наличие сильно выраженных сателлитов, по сравнению со спектрами Fe2p и Ni2p в продуктах коррозии через 3 и 6 месяцев выдержки. Такие сателлиты характерны для соединений железа/никеля с хлором, что может свидетельствовать об образовании в продуктах коррозии

покрытия после 2 месяцев выдержки хлоридных соединений. Через 3 месяца большая часть атомов железа/никеля образует соединения с кислородом оксидной или гидроксидной природы, что приводит к уменьшению интенсивности спутников. Поскольку ОН-группа является аддендом более сильного поля (чем хлорид-ион), она вызывает большее расщепление электронного уровня d-орбиталей в Fe/Ni. Следовательно, железо/никель в гидроксосоединениях находятся в более низкоспиновом состоянии, по сравнению с железом/никелем в хлоридных соединениях. Переход в состояние с более низким спином сопровождается подавлением спутников, что приводит к сглаживанию фотоэлектронного спектра элемента.

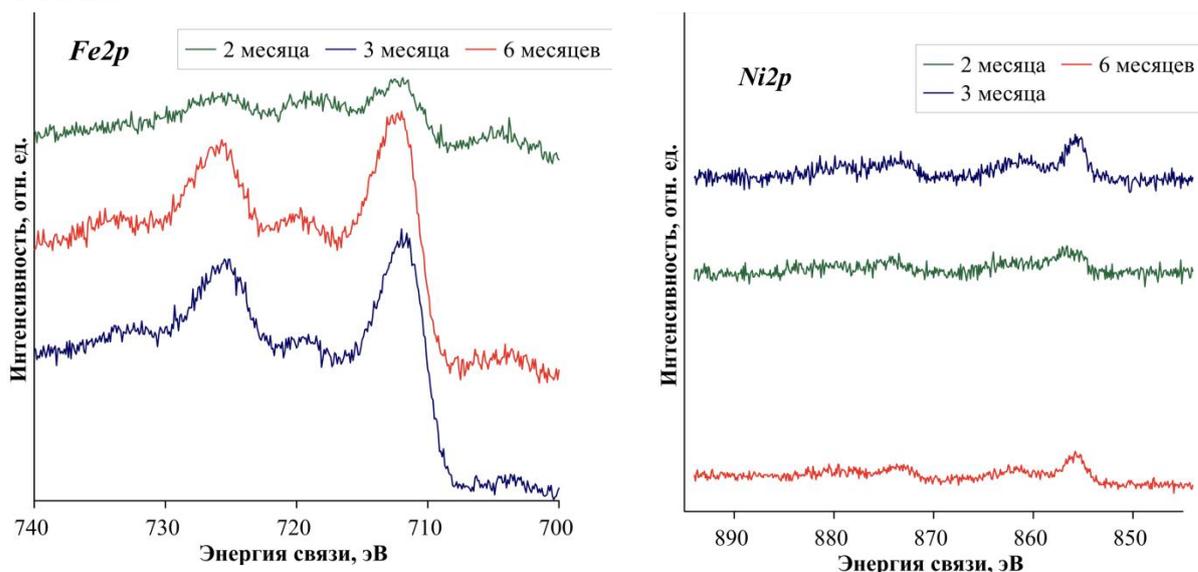


Рис. 10 – РФЭ спектры Fe2p и Ni2p в продуктах коррозии ДЦ покрытий FeZn и NiZn при различном времени выдержки в 3 масс. % NaCl

Неоднородность поверхности продуктов коррозии также вносит вклад в интенсивность спутников. При увеличении времени выдержки развивается морфология поверхности, однако роста интенсивности спутников не наблюдается, что может свидетельствовать о том, что доминирующим вкладом является химическое окружение элемента.

В разделе 3.4 представлены методика получения, физико-химические и коррозионные свойства гальванодиффузионных цинковых покрытий.

Для получения гальванодиффузионных цинковых (ГДЦ) покрытий перед диффузионным цинкованием проводили электролитическое осаждение никеля на стальные образцы. Электроосаждение никелевого покрытия проводили в электролите Уоттса (300 г/л $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 40 г/л $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 40 г/л H_3BO_3) при температуре $50 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 1 минуты при плотности тока 70 mA/cm^2 . Образцы с никелевым покрытием подвергали диффузионному цинкованию при температуре $420 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 2 часов. Толщина никелевого слоя $1,5 \pm 0,1 \text{ мкм}$. Толщина цинкового покрытия по результатам металлографии $40 \pm 1 \text{ мкм}$.

На рис. 11, а представлено электронно-микроскопическое изображение металлографического шлифа покрытия FeNiZn. Граница раздела между покрытием и подложкой хорошо различима, при этом слоя гальванического никеля не наблюдается. Слой покрытия, контактирующий с подложкой, толщиной ~ 34 мкм имеет волокнистую пористую структуру, трещины отсутствуют. Внешний слой покрытия толщиной ~ 7 мкм однородный и обладает более плотной структурой ближе к зеренному типу с небольшим количеством дефектов. Химический состав указанных слоев также отличается. Нижний слой состоит из железа (9 – 12 ат. %) и цинка (88 – 91 ат. %), никель отсутствует. Согласно диаграмме Fe – Zn, концентрации металлов находятся в диапазоне δ -фазы (FeZn_{7-10}). В верхнем слое покрытия, концентрация никеля 16 – 18 ат. %, а цинка 82 – 85 ат. %, железо отсутствует. Данное соотношение никеля и цинка соответствует γ -фазы $\text{Ni}_2\text{Zn}_{11}$. Покрытие, по-видимому, является гетерофазным по толщине.

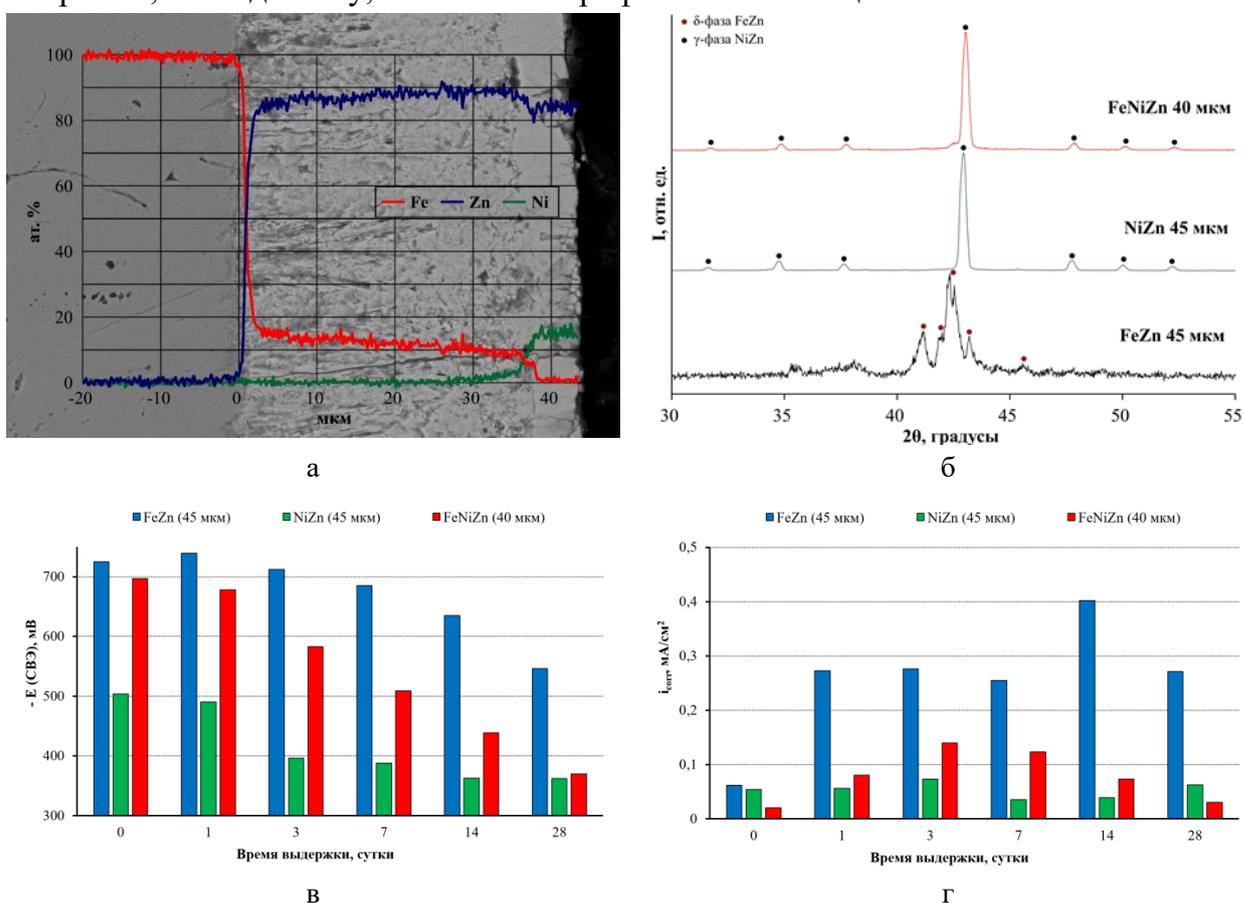


Рис. 11 – РЭМ изображение поперечного сечения шлифа и профиль химического состава покрытия FeNiZn толщиной 41 мкм (а); дифрактограммы диффузионных и гальванодиффузионных покрытий (б); зависимость электродного потенциала (в) и плотности тока (г) покрытий FeZn, NiZn и FeNiZn от времени выдержки

На рис. 11, б представлены дифрактограммы ДЦ и ГДЦ покрытий. Все рефлексы на дифрактограмме покрытия FeNiZn можно отнести к γ -фазе состава $\text{Ni}_2\text{Zn}_{11}$, что подтверждает предположение о том, что верхний слой КДЦ покрытий полностью состоит из NiZn фазы.

На рис. 11, в представлены электродные потенциалы покрытий при различной экспозиции в 3 масс. % NaCl. Электродный потенциал комбинированных FeNiZn покрытий имеет более отрицательные значения по сравнению с диффузионными покрытиями NiZn, но положительнее потенциала FeZn покрытий на 176 мВ. Плотность тока коррозии (рис. 11, г) покрытий FeNiZn после 28 дней выдержки в 2 раза ниже, чем покрытия NiZn, и в 9 раз меньше, чем покрытия FeZn.

ВЫВОДЫ

1. Получены диффузионные интерметаллические покрытия FeZn и NiZn толщиной от 10 до 80 мкм диффузионным цинкованием в порошках цинка с наноструктурированной поверхностью частиц. Толщина покрытий и концентрация цинка возрастают при увеличении времени обработки. Покрытия FeZn состоят из δ -фазы FeZn₇₋₁₀, при этом концентрация цинка находится в интервале от 89,0 до 92,5 масс. %, а покрытия NiZn состоят из γ -фазы Ni₂Zn₁₁, с концентрацией цинка от 84,0 до 88,2 масс. %.
2. Показано, что коррозия покрытий FeZn и NiZn как в щелочных, так и в нейтральных средах сопровождается преимущественным растворением Zn из интерметаллических фаз. Морфология поверхности покрытий при этом изменяется за счет образования трещин и других дефектов, которые провоцируют появление трехмерного фронта растворения и гальванической связи между подложкой и слоями покрытий. Указанные эффекты увеличивают скорость коррозии покрытий.
3. Установлено, что продуктами выщелачивания диффузионных интерметаллических покрытий FeZn и NiZn являются твердые растворы Zn в соответствующих металлах. В нейтральном растворе NaCl основным кристаллическим продуктом коррозии покрытий FeZn и NiZn является оксид цинка. В продуктах коррозии NiZn обнаружен основной хлорид цинка, который отсутствует в продуктах коррозии покрытий FeZn. Это связано как с различиями в прекурсорах коррозионного слоя на поверхности покрытий, так и с влиянием легирующих элементов сплавов на pH приэлектродного слоя.
4. Получены гальванодиффузионные покрытия FeNiZn диффузионным цинкованием никелевых гальванических покрытий, нанесенных на стальную подложку. Покрытия обладают сложной слоистой структурой, верхний слой которой состоит из γ -фазы Ni₂Zn₁₁, а слой, примыкающий к подложке, имеет химический состав, близкий к δ -фазе состава FeZn₇₋₁₀. Скорость коррозии гальванодиффузионных FeNiZn покрытий ниже, чем у покрытий FeZn и NiZn, а плотность тока в 9 раз ниже по сравнению с покрытиями FeZn. Покрытия FeNiZn перспективны для антикоррозионной защиты стальных изделий.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. Biryukov A.I. et al. The effect of the chemical composition of intermetallic phases on the corrosion of thermal diffusion zinc coatings / A.I. Biryukov, R.G. Galin, D.A. Zakharyevich, A.V. Wassilkowska, **T.V. Batmanova** // Surface and coatings technology. – 2019. – V. 372. – p. 166-172. (4 с./ 7 с.) *Scopus (Q1)*
2. Biryukov A.I. et al. et al. A layer-by-layer analysis of the corrosion properties of diffusion zinc coatings / A.I. Biryukov, R.G. Galin, D.A. Zakharyevich, A. Wassilkowska, A.V. Kolesnikov, **T.V. Batmanova** // Archives of Metallurgy and Materials. – 2020. – V. 65. – №1. – p. 99-102. (3 с./ 4 с.) *Scopus, Web of Science (Q3)*
3. Biryukov A.I. et al. Corrosion of diffusion iron-zinc coatings (δ -phase) in an alkaline medium / A.I. Biryukov, O.A. Kozaderov, D.A. Zakharyevich, R.G. Galin, L.O. Burmistrov, **T.V. Batmanova** // Int. J. Corros. Scale Inhib. – 2021. – V. 10. – №. 4. – p. 1677-1688. (8 с./ 12 с.) *Scopus, Web of Science (Q2)*
4. Biryukov A.I. et al. Corrosion of diffusion zinc coatings in sodium chloride solutions / A.I. Biryukov, D.A. Zakharyevich, **T.V. Batmanova**, R.G. Galin, M.N. Ulyanov, V.E. Zhivulin // Chimica Techno Acta. – 2022. – V. 9. – №. 4. – № 20229421. (4 с./ 6 с.) *Scopus (Q4)*
5. Biryukov A.I. et al. Features of the corrosion of coatings based on zinc alloys: oxidation products and the selective dissolution of zinc. Review / A. I. Biryukov, O.A. Kozaderov, **T.V. Batmanova** // Condensed Matter and Interphases. – 2024. – V. 26. – №. 1. – p. 25-36. (7 с./ 12 с.) *перечень ВАК, Scopus (Q4)*
6. Biryukov A.I. et al. Corrosion of the diffusion zinc coatings in neutral chloride solutions / A.I. Biryukov, D.A. Zakharyevich, R.G. Galin, **T.V. Batmanova**, V.E. Zhivulin, M.N. Ulyanov, A.G. Fazlitdinova, E.V. Zhizhin, A.V. Koroleva, I.A. Kasatkin, O.A. Kozaderov // Int. J. Corros. Scale Inhib. – 2024. – V. 13. – №1. – p. 337–356. (4 с./ 7 с.) *Scopus, Web of Science (Q2)*

Тезисы докладов и статьи в сборниках материалов конференций:

1. Бирюков А.И. Коррозионно-электрохимическое поведение диффузионных цинковых покрытий в коррозионно-активных средах / А.И. Бирюков, Д.А. Захарьевич, **Т.В. Батманова** // Современные методы в теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов IX Всероссийской (с международным участием) научной конференции. – Иваново: институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 2017 – с. 14. (0,6 с./ 1 с.)
2. Захарьевич Д.А. Образование и строение симонколлелита на поверхности термодиффузионных цинковых покрытий / Д.А. Захарьевич, А.И. Бирюков, **Т.В. Батманова** // Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов: сборник материалов III Международной

- научной конференции молодых ученых. – Саратов: ГАУ ДПО «СОИРО», 2017. – с. 160-163. (2 с./ 3 с.)
3. **Батманова Т.В.** Особенности коррозионного поведения слоев δ -фазы диффузионных цинковых покрытий / Т.В. Батманова, А.В. Колесников, А.И. Бирюков // Достижения молодых ученых: Химические науки, Уфа, 2018 – с. 329 – 330. (0,7 с./ 1 с.)
 4. Бирюков А.И. Коррозионное поведение диффузионных цинковых покрытий в хлоридсодержащих средах / А.И. Бирюков, Д.А. Захарьевич, **Т.В. Батманова** // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН – 2018): материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2018. – с. 80-81. (0,6 с./ 1 с.)
 5. **Батманова Т.В.** Коррозионное поведение диффузионных цинковых покрытий в хлоридсодержащих средах / Т.В. Батманова, А.В. Колесников, А.И. Бирюков // Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXIX Российской молодежной научной конференции с международным участием. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. – с. 250. (0,8 с./ 1 с.)
 6. **Батманова Т.В.** Влияние содержания цинка на коррозионно-электрохимическое поведение диффузионных цинковых покрытий / Т.В. Батманова, А.В. Колесников, А.И. Бирюков, Д.А. Захарьевич // XXII Всероссийская конференция молодых учёных-химиков с международным участием. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2019. – с. 380. (0,6 с./ 1 с.)
 7. Бирюков А.И., Коррозионное поведение диффузионных железозинковых покрытий в слабокислых и нейтральных хлоридсодержащих средах / А.И. Бирюков, Р.Г. Галин, Д.А. Захарьевич, А.В. Колесников, **Т.В. Батманова** // 2-я Международная конференция «Коррозия в нефтегазовой отрасли» - Corrosion Oil&Gas. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 2021. – с. 20. (0,6 с./ 1 с.)
 8. **Батманова Т.В.**, Изучение свойств продуктов коррозии железозинковых покрытий электрохимическими и физическими методами / Т.В. Батманова, А.И. Бирюков, А.В. Колесников, Д.А. Захарьевич // Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXXI Российской молодежной научной конференции с международным участием. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. – с. 216. (0,7 с./ 1 с.)
 9. Бирюков А.И., Особенности коррозии диффузионных покрытий Fe-Zn на основе δ -фазы в щелочных и кислых средах / А.И. Бирюков, Д.А. Захарьевич, Р.Г. Галин, **Т.В. Батманова**, В.Е. Живулин, О.А. Козадеров // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН-2021): материалы IX Всероссийской конференции с

- международным участием. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. – с. 34-35. (0,6 с./ 1 с.)
10. Захарьевич Д.А., Диффузионные цинковые покрытия для условий нефтедобычи / Д.А. Захарьевич, А.И. Бирюков, Р.Г. Галин, **Т.В. Батманова** // труды XXIV Международной научно-практической конференции ТРУБЫ-2021, 2021. – с. 98-104. (4 с./ 7 с.)
 11. **Батманова Т.В.**, Изучение коррозионного поведения диффузионных цинковых покрытий на металлах триады железа / Т.В. Батманова, А.И. Бирюков // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2022. – с. 353-354. (0,8 с./ 1 с.)
 12. **Батманова Т.В.**, Коррозионная стойкость диффузионных цинковых покрытий в нейтральных хлоридсодержащих средах / Т.В. Батманова, А.И. Бирюков // Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXXII Российской молодежной научной конференции с международным участием. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. – с. 211. (0,8 с./ 1 с.)
 13. **Батманова Т.В.**, Влияние продуктов коррозии на коррозионное поведение при длительной выдержке диффузионных цинковых покрытий / Т.В. Батманова, А.И. Бирюков // Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXXIII Российской молодежной научной конференции с международным участием. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2023. – с. 353. (0,7 с./ 1 с.)
 14. **Батманова Т.В.**, Исследование коррозионного поведения интерметаллических диффузионных цинковых покрытий / Т.В. Батманова, А.И. Бирюков // XIX Российская конференция «Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов». – Екатеринбург: Издательский Дом "Ажур", 2023. – с. 418-421. (3 с./ 4 с.)
 15. **Батманова Т.В.**, Исследование коррозионного поведения интерметаллических диффузионных цинковых покрытий / Т.В. Батманова, А.И. Бирюков // Электрохимия и коррозия металлов и сплавов: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – с. 57-59. (1,5 с./ 2 с.)
 16. Бирюков А.И., Эволюция структурно-фазового состава и морфологии поверхности при коррозии и анодном растворении диффузионных интерметаллических покрытий / А.И. Бирюков, Д.А. Захарьевич, **Т.В. Батманова**, Н.С. Амелина, В.Е. Живулин, О.А. Козадеров // Электрохимия и коррозия металлов и сплавов: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – с. 53-54. (1 с./ 2 с.)

Главы в коллективных монографиях:

1. Бирюков А.И. Актуальные проблемы электрохимии сплавов и защиты от коррозии. Глава 2. Коррозия интерметаллических диффузионных цинковых покрытий: монография / А.И. Бирюков, О.А. Козадеров, Д.А. Захарьевич, Р.Г. Галин, **Т.В. Батманова** // под ред. О.А. Козадерова. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2023. – 164 с. – ISBN 978-5-4446-1857-8. (11 с./ 21 с.)

Батманова Татьяна Викторовна

**ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ДИФФУЗИОННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В ЩЕЛОЧНЫХ И
НЕЙТРАЛЬНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 1.4.4. Физическая химия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Подписано в печать 10.04.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ 161

Отпечатано в издательстве Челябинского государственного университета.
454021, г. Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 57б.