

ГЛАВА 4

**ЗАЩИТНЫЕ SMART-ПОКРЫТИЯ,
ИМПРЕГНИРОВАННЫЕ
ИНГИБИТОРАМИ КОРРОЗИИ,
НА СПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ**

Алюминий и его сплавы благодаря низкому удельному весу, прочности и пластичности занимают лидирующую позицию среди цветных металлов по масштабам использования в промышленности [470]. Алюминиевые сплавы обладают высокой ударной вязкостью, благодаря чему Al стал одним из важнейших конструкционных материалов в авиастроении [471]. Однако эксплуатация металлических изделий в агрессивных средах (морская вода, соляной туман, повышенная влажность и др.) приводит к их коррозии и ограничению ресурса [472,473]. Коррозионные процессы металлов напрямую связаны с безопасностью использования и экономической эффективностью применяемых материалов. При возникновении коррозии механические свойства материала могут значительно ухудшаться и, если вовремя не устранить очаги деградации, придется заменять все изделие на новое. Разработка технологий, направленных на повышение коррозионной стойкости алюминия и его сплавов, является сегодня актуальной задачей [474–477].

Монография посвящена приоритетному направлению в развитии технологии защиты металлов – разработке способов формирования новых многофункциональных покрытий [478–481]. Преимуществом данных методов является возможность повышения не только коррозионной стойкости металла, но и твердости, износостойкости, жаростойкости, а также модификации электрических свойств (электроизоляционных или электропроводящих). Покрытия, полученные методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО), обладают высокой адгезией к подложке [27]. Такие защитные слои также характеризуются простотой формирования и широким диапазоном возможного состава, микроструктуры, пористости и шероховатости, что обеспечивается варьированием состава электролита и режимов процесса ПЭО [2,4,6,18]. В предыдущих главах представлены перспективные способы защиты магниевых сплавов, обработанных ПЭО, для применения в разных областях промышленности и медицине.

Многие исследовательские группы используют метод ПЭО для модификации поверхности также алюминиевых сплавов. В работе [472] на алюминиевом сплаве Д16Т был сформирован ПЭО-слой в щелочном силикатном электролите с добавкой $\text{Co}(\text{OH})_2$, снижающий скорость коррозии до 24 раз. Авторы работы [477] показали, что добавление углеродных нанотрубок в силикатный электролит для ПЭО способствует уменьше-

нию размера микропор покрытия. Методом ПЭО была получена коррозионностойкая керамическая пленка на композите 2024 Al/SiC в силикатном растворе [473]. В работе [474] для повышения коррозионной стойкости сплава Al 7075 формировали ПЭО-слои и изучали влияние частоты поляризационного сигнала на изменение микроструктуры, химического состава и защитных свойств покрытий. Авторы работы [470] исследовали влияние шероховатости поверхности подложки на усталостную прочность сплава алюминия 2024-T3 с ПЭО-покрытием. В работе [475] было показано, что добавка $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$ в силикат-гидроксидные электролиты повышает однородность и коррозионную стойкость ПЭО-покрытий, формируемых на сплаве алюминия ZL108. Было установлено, что увеличение плотности катодного тока в процессе ПЭО способствует повышению плотности и коррозионной стойкости покрытий, формируемых на сплаве алюминия 7075 в многокомпонентном электролите [482]. В работе [483] добавление наночастиц SiO_2 в состав фосфатно-гидроксидного электролита повышало коррозионную и износостойкость базового ПЭО-слоя. ПЭО-покрытие повышало коррозионную стойкость и износостойкость также образца алюминиевого сплава 7075, сформированного методом холодного напыления [484]. Представленные исследования доказывают эффективность метода ПЭО в улучшении поверхностных свойств материалов на основе алюминия.

Следует отметить, что морфология ПЭО-покрытий не позволяет обеспечить необходимый уровень защитных свойств материала. Тем не менее, как было показано в предыдущих главах, пористую часть ПЭО-слоя можно использовать в качестве емкости для загрузки различных модифицирующих агентов, например ингибиторов коррозии или полимеров, для повышения коррозионной стойкости материала. Авторы работ [485,486] модифицировали ПЭО-слой, сформированный на сплаве алюминия 2024 в силикатном электролите, с помощью обработки в растворе политетрафторэтилена. В работе [487] использовали ПЭО-покрытие на сплавах 7020AA и AZ80 в качестве предварительной обработки для формирования золь-гель пленки. В недавнем обзоре [488] обобщены исследования, посвященные формированию, особенностям и применению ПЭО-покрытий, модифицированных различными типами полимеров, – композиционных покрытий с двухуровневой защитой. Формирование таких покрытий, снижающих скорость коррозии металлов и сплавов, широко исследуется в последнее десятилетие [22,488,489].

4.1 Самовосстанавливающиеся покрытия на сплаве алюминия АМгЗ

Одним из наиболее распространенных способов защиты алюминия, как и других металлов, от агрессивных сред является ингибирование процесса коррозии. Ингибиторами коррозионной деградации функциональных материалов, включая алюминий и его сплавы, могут выступать вещества как неорганической, так и органической природы: хроматы, нитриты, ванадаты, молибдаты, природные камеди, амины, хинолины, производные имидазола и пиридина, фталоцианины, биополимеры/углеводородные полимеры и др. [490–511]. Среди них вещества из группы азолов (1,2,4-триазол, бензотриазол и др.), снижающие

скорость как анодных, так и катодных процессов, эффективно ингибируя коррозию алюминия [512,513]. При этом ингибиторы этой группы безопасны (по сравнению со многими неорганическими ингибиторами коррозии) и доступны (по сравнению с ингибиторами, содержащими редкоземельные элементы).

4.1.1 Триазолсодержащие покрытия с пролонгированным защитным действием

Целью исследования, представленного в данном разделе, является разработка способа формирования триазолсодержащих покрытий с пролонгированным уровнем коррозионной защиты алюминиевого сплава АМгЗ. Была сформирована подходящая для импрегнирования матрица на основе ПЭО-покрытия с микротрубчатой структурой. Пропитка ПЭО-покрытия ингибитором (бензотриазолом и 1,2,4-триазолом) была направлена на функционализацию оксидного ПЭО-слоя за счет эффекта самовосстановления, обеспечивающего активную защиту материала от коррозии. Для повышения уровня антикоррозионных свойств сформированных на поверхности Al-сплава ингибиторсодержащих композиционных покрытий их обрабатывали полимерным материалом – поливинилиденфторидом (ПВДФ).

Далее исследовали свойства таких покрытий. Для изучения химического/фазового состава, структуры, морфологии и адгезионных свойств защитных слоев использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (ЭДС), рентгенофазовый анализ (РФА), конфокальную рамановскую (КР) и рентгенофотоэлектронную спектроскопию (РФЭС) и скретч-тестирование. Защитные свойства покрытий были исследованы с помощью электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) и локальных сканирующих электрохимических методов: SVET (метод сканирующего вибрирующего электрода) и SIET (метод сканирующего ионоселективного электрода). Установлен механизм деградации Al-сплава с покрытием в хлоридсодержащих растворах, что позволило определить коррозионное поведение перспективного конструкционного материала. Результаты показали, что применение фторполимерного материала в сочетании с эффективными ингибиторами коррозии существенно повышает коррозионную стойкость, а также однородность поверхности покрытий по сравнению с базовым ПЭО-слоем. Публикации о подобных исследованиях нам неизвестны.

Эксперименты проведены с образцами из алюминиево-магниевого сплава АМгЗ (масс. %: Mg – 3,8; Mn – 0,6; Si – 0,8; Fe – до 0,5; Ti, Cu, Zn – каждый до 0,1; Al – остальное) размерами 35 × 45 × 2 мм. Перед нанесением покрытия образцы обрабатывали на шлифовально-полировальной машине TwinPrep 5x (Allied High Tech Products, Inc., Комптон, Калифорния, США). Шлифование проводили карбидокремниевой бумагой с постепенным уменьшением размера абразивного зерна до 14–20 мкм (P1000). После подготовки поверхности образцы обезжиривали этанолом и сушили на воздухе.

ПЭО-покрытия на образцах АМгЗ формировали в гальваностатическом режиме при плотности тока 0,95 А·см⁻² в продолжение 40 с. Электролитом служил водный раствор фторида натрия (NaF, 35 г/л) и тартрата калия (K₂C₄H₄O₆, 0,6 г/л).

Образцы с ПЭО-покрытием пропитывали ингибиторами коррозии 1,2,4-триазолом или бензотриазолом из 0,05 М водного раствора. Такая концентрация ингибитора явля-

ется оптимальной и широко используется различными научными группами [43,83,370]. рН растворов, содержащих ингибитор для импрегнирования ПЭО-покрытий, был доведен до нейтрального (рН = 7,0–7,2). Для обеспечения лучшего заполнения микроконтейнеров (пористой части ПЭО-слоя) пропитку ингибиторами проводили под вакуумом в аппарате вакуумной импрегнации Еровас (Struers, Копенгаген, Дания). После этого образцы погружали в раствор при постоянном перемешивании на 0,5, 1, 2 и 24 ч для определения наиболее оптимального времени импрегнации. Затем образцы медленно извлекали из раствора и сушили в эксикаторе при температуре 40 °С в течение 24 ч.

Образцы с лучшими антикоррозионными характеристиками были обработаны поливинилиденфторидом для повышения защитных свойств образованных композиционных покрытий (КП). Полимер растворяли в метилпирролидоне в соотношении 1:20 и наносили методом распыления на поверхность образцов. Толщина слоя ПВДФ составляла 3 мкм. Защитные слои, содержащие ингибиторы и полимеры, мы называем гибридными покрытиями (ГП). В результате были получены следующие типы покрытий.

ПЭО	Базовый ПЭО-слой
КП-Т-0,5/1/2/24	Выдержка ПЭО-образца в растворе 1,2,4-триазола в течение 0,5, 1, 2 и 24 ч
КП-Б-0,5/1/2/24	Выдержка ПЭО-образца в растворе бензотриазола в течение 0,5, 1, 2 и 24 ч
КП-П	Обработка ПЭО-образца поливинилиденфторидом (ПВДФ) методом распыления
ГП-Т-24-П	Обработка образца с 1,2,4-триазолом (КП-Т-24) ПВДФ методом распыления
ГП-Б-24-П	Обработка образца с бензотриазолом (КП-Б-24) ПВДФ методом распыления

Схема формирования композиционных и гибридных покрытий на алюминиевом сплаве АМгЗ представлена на **рис. 4.1**.

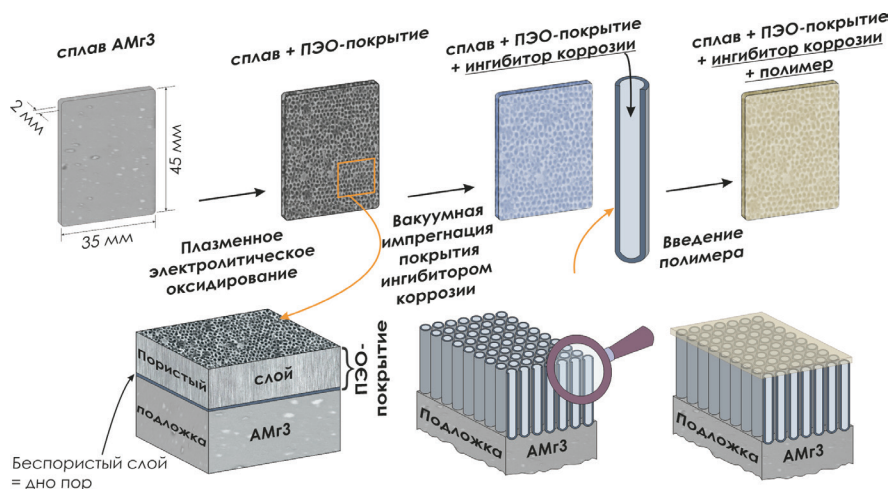


Рис. 4.1. Стадии формирования композиционных и гибридных покрытий

Морфология и химический состав покрытий

СЭМ–ЭДС анализ. Исследования ПЭО-слоя сканирующей электронной микроскопией и энергодисперсионной спектроскопией проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа EVO 40 (Carl Zeiss, Германия), оснащенного кремниевым дрейфовым детектором X-MaxN 80 (Oxford Instruments NanoAnalysis, Конкорд, США).

Для изучения поперечного сечения покрытий образцы фиксировали эпоксидной смолой (EpoxySet#145-20005, Allied High Tech Products Inc., США). Использовали форму FixiForm (Struers A/S, Баллеруп, Дания) диаметром 30 мм. Образцы шлифовали и полировали на станке Tegramin-25 (Struers A/S, Дания) при помощи шлифовальной бумаги (SiC Foil, MD-Largo, Struers A/S, Дания) и полировальных дисков (MD-Mol, MD-Chem, Struers A/S, Баллеруп, Дания). Для подготовки поверхности использовали алмазные суспензии (DP-Suspension P, Struers A/S, Копенгаген, Дания) с размером абразива 9–3 мкм совместно с DP-Lubricant Brown.

На **рис. 4.2** представлены данные СЭМ–ЭДС по морфологии и составу базового (рис. 4.2а) и композиционных покрытий (рис. 4.2 б, в). На СЭМ-изображениях поперечного сечения образцов видно, что матрица базового ПЭО-покрытия имеет пористую структуру. Средний диаметр пор варьирует от 200 до 300 нм (рис. 4.2а). Поры ПЭО-слоя имеют упорядоченную самоорганизованную структуру (в отличие от хаотично распределенных пор в структуре ПЭО-покрытия, сформированного на магнии и его сплавах), представленную микротрубками со средней высотой ~10 мкм (рис. 4.2б). Морфоло-

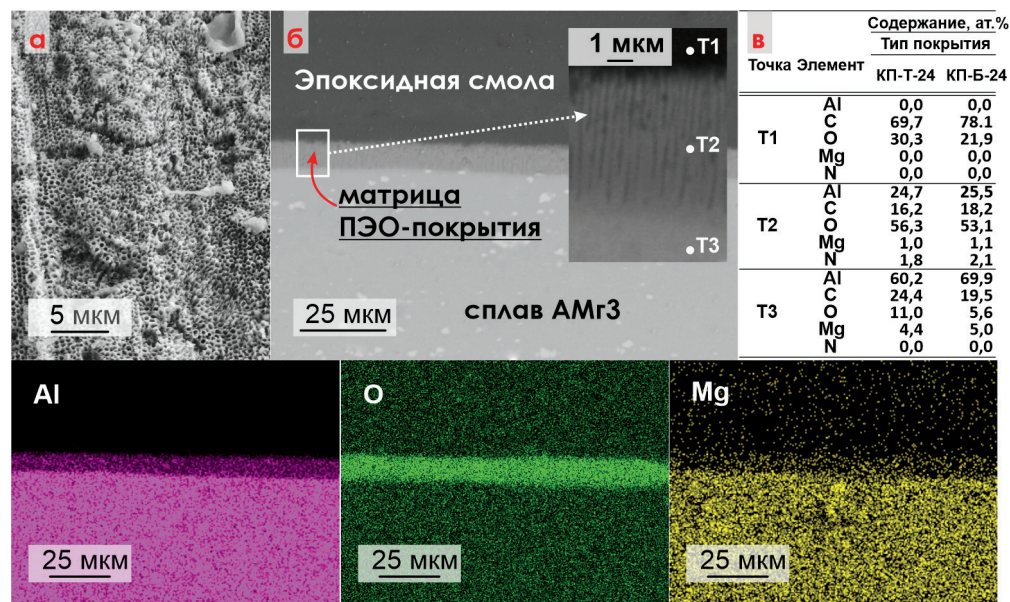


Рис. 4.2. Данные СЭМ–ЭДС-анализа морфологии и элементного состава базового ПЭО-покрытия (а) и КП-Т-24 (б). Показано распределение элементов в трех точках поперечного сечения образцов КП-Т-24 и КП-Б-24 (в). Стрелкой отмечено место на композиционном покрытии КП-Т-24 (в качестве примера), где были сняты спектры ЭДС

гия ПЭО-покрытий позволяет использовать образовавшиеся поверхностные структуры в качестве микроконтейнеров для дальнейшей пропитки ингибиторами коррозии. Из анализа ЭДС-данных следует, что в состав матрицы ПЭО-покрытия входят алюминий и кислород (рис. 4.2). Также был обнаружен магний, поскольку он является основным легирующим элементом сплава АМгЗ.

Для подтверждения наличия ингибиторов коррозии в порах композиционных покрытий КП-Б-24 и КП-Т-24 были записаны ЭДС-спектры в трех разных точках (Т1, Т2, Т3) поперечных сечений образцов (Т1 – эпоксидная смола, Т2 – КП-покрытие, Т3 – подложка сплава АМгЗ). Наличие азота в точке Т2 поперечного сечения образцов с ингибиторсодержащими покрытиями (рис. 4.2в) и отсутствие данного элемента на двух других участках свидетельствуют о загрузке сформированных микроконтейнеров ингибиторами коррозии.

Рентгенофазовый анализ образцов с ПЭО-слоем проводился с помощью дифрактометра SmartLab (Ригаку, Токио, Япония). Для РФА использовали $\text{CuK}\beta$ -излучение и геометрию Брэгга–Брентано. Спектры получены в диапазоне $2\theta = 4^\circ\text{--}90^\circ$ с шагом $0,01^\circ$, током генератора 140 мА и напряжением 42 кВ при комнатной температуре.

По результатам РФА в составе образца с ПЭО-покрытием в качестве кристаллических фаз были обнаружены только интерметаллиды алюминия (Al) и алюминия–магния ($\text{Al}_{37}\text{Mg}_3$)_{0,1}, входящие в состав подложки (рис. 4.3). Интерметаллид Al-Mg в составе подложки является результатом легирования алюминия магнием [514]. Можно предположить, что Al- и O-содержащие соединения (вероятно, Al_2O_3), установленные методом ЭДС, находятся в аморфном состоянии. Это предположение поддерживается наличием на спектре широкого гало, зафиксированного при малых углах (до 30°). В результате сильного нагрева и резкого охлаждения образца (продолжительность жизни плазменного разряда 10–200 мкс) вещество на границе раздела подложка/покрытие переходит в аморфное состояние. РФЭС-данные подтверждают данное предположение. Принимая во внимание жесткие условия, реализующиеся в процессе ПЭО (температура и давление в каналах плазменного разряда достигает 104 К и 102 МПа соответственно), нали-

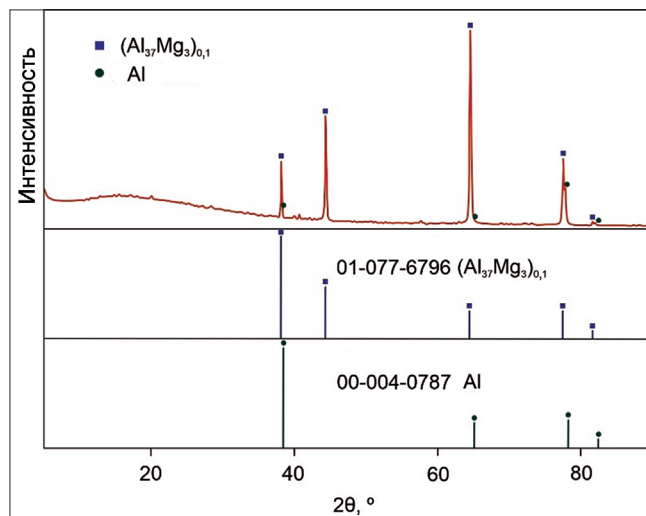


Рис. 4.3. Дифрактограмма образца сплава алюминия с ПЭО-покрытием

чие алюминия в металлической форме и $(\text{Al}_{137}\text{Mg}_3)_{0,1}$ в составе покрытия (по результатам РФА) невозможно и обусловлено низкой отражательной способностью ПЭО-слоев.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия образцов КП-Т-24 и КП-Б-24 была проведена в условиях сверхвысокого вакуума (0,5 мкПа) с помощью спектрометрического комплекса SPECS (SPECS GmbH, Германия) с полусферическим электростатическим энергоанализатором RHOIBOS-150 при использовании немонохроматического $\text{AlK}\alpha$ -излучения с энергией 1486,6 эВ. Для калибровки спектров использовали линию алифатического углерода (линия $\text{C}1s$) с энергией связи 285,0 эВ. Поверхность образцов подвергалась травлению Ag^+ в течение 3 мин при энергии 5000 эВ для удаления загрязнений и анализа внутренних слоев сформированного покрытия. Ионное травление привело к уменьшению толщины покрытия на 3–5 нм.

Образец КП-Т-24 (до травления, **рис. 4.4**) содержит значительное количество кислорода, углерода и алюминия (**табл. 4.1**). Спектры $\text{Al } 2p$ (при энергии связи 74,4 эВ) и $\text{O } 1s$ (при $E_{\text{св}} = 531,7$ эВ) свидетельствуют о присутствии Al_2O_3 в анализируемом слое. Азот как «пиррольного», так и «пиридинового» типа, обнаруженный при энергиях связи 400 и 399 эВ, обусловлен наличием этих форм гетероатома в 1,2,4-триазоле (**рис. 4.4**; **табл. 4.1**) и бензотриазоле (**рис. 4.5**; **табл. 4.1**). После травления доля алюминия заметно увеличивается, а углерода – снижается. Это свидетельствует об удалении примесей и части ингибиторсодержащего слоя.

Таблица 4.1

Энергия связи (эВ) и элементный состав (ат.% в скобках) поверхности образцов с 1,2,4-триазол- и бензотриазолсодержащим покрытием

Элемент	Химическое состояние	КП-Т-24		КП-Б-24	
		до травления	после травления	до травления	после травления
F (1s)	CF_x	689,3 (0,5)	687,8 (0,5)	689,0 (0,4)	687,8 (0,4)
	MF^*	685,8 (1,1)	686,1 (1,2)	685,4 (1,2)	686,3 (1,2)
O (1s)	CO_x	533,1 (20,1)	533,0 (21,0)	532,7 (20,9)	533,0 (23,4)
	Al_2O_3	531,7 (17,9)	531,6 (19,4)	531,4 (15,1)	531,7 (19,5)
N (1s)	$-\text{NH}-$	400,4 (1,1)	400,7 (0,8)	400,6 (2,4)	400,4 (1,0)
	$=\text{N}-$	399,1 (0,6)	398,5 (0,6)	399,3 (0,9)	398,3 (0,8)
C (1s)	$\text{O}-\text{C}=\text{O};$	288,6 (3,7)	288,9 (2,7)	288,5 (5,7)	288,4 (0,8)
	$\text{C}-\text{O}-\text{C}; \text{C}-\text{N}$	286,4 (9,3)	286,4 (5,1)	286,3 (9,7)	286,3 (5,6)
	$\text{C}-\text{C}; \text{C}-\text{H}$	285,0 (24,0)	285,0 (12,5)	285,0 (25,2)	285,0 (10,8)
	MC^{**}	–	283,0 (6,4)	–	283,2 (3,5)
Si (2p)	SiO	102,0 (1,3)	102,0 (1,5)	101,8 (1,0)	101,7 (1,8)
	SiC	100,3 (2,6)	100,5 (3,1)	99,9 (2,2)	100,0 (3,4)
Al (2p)	Al^{3+}	74,4 (17,0)	75,0 (24,1)	74,8 (14,8)	75,0 (27,3)
Mg (2s)	Mg^{2+}	90,0 (0,8)	91,4 (1,1)	89,0 (0,5)	89,5 (0,5)

*Фторид металла.

**Карбид металла.

Спектры, полученные для бензотриазолсодержащего образца КП-Б-24 (**рис. 4.5**; **табл. 4.1**), сопоставимы со спектрами, наблюдаемыми для образца, пропитанного 1,2,4-триазолом (КП-Т-24). Содержание и состояние соответствующих химических

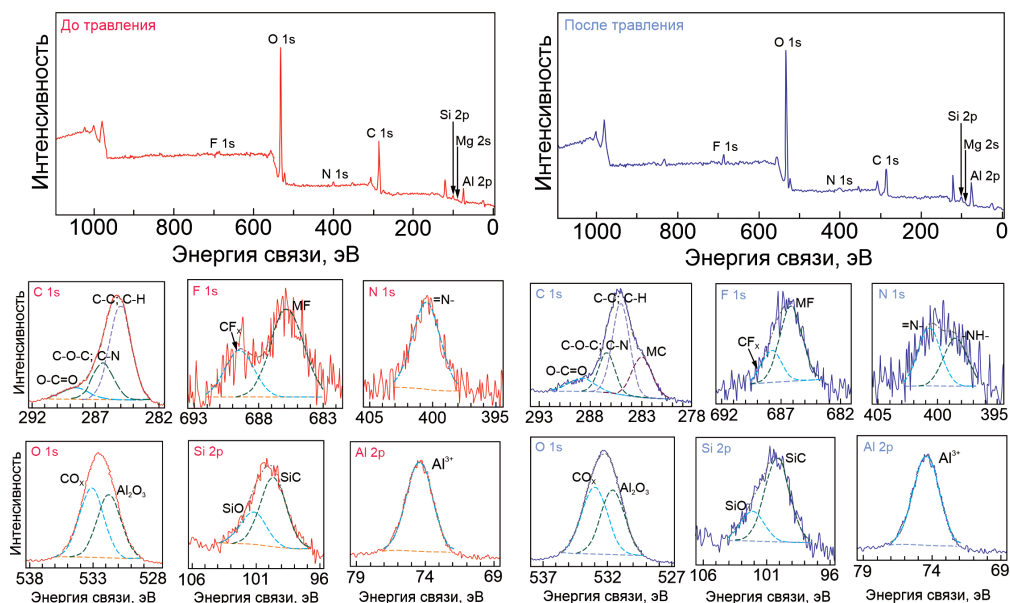


Рис. 4.4. Обзорные РФЭС-спектры и спектры высокого разрешения, полученные для образца с композиционным покрытием, содержащим 1,2,4-триазол (0,05 M), до и после травления Ar⁺

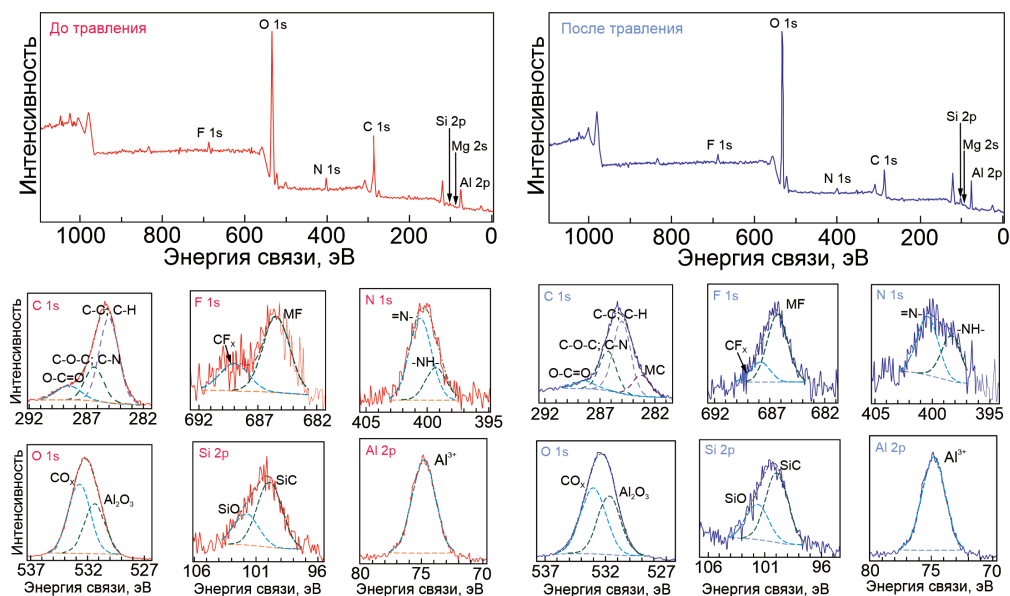


Рис. 4.5. Обзорные РФЭС-спектры и спектры высокого разрешения, полученные для образца с композиционным бензотриазолсодержащим покрытием до и после травления Ar⁺.

элементов различаются незначительно. Сходство С 1s-спектров 1,2,4-триазол- и бензотриазолсодержащих образцов свидетельствует о схожем вкладе ингибитора в состав анализируемого поверхностного слоя (толщиной около 3–5 нм). При этом структура ПЭО-покрытия состоит преимущественно из Al_2O_3 . РФЭС-анализ установил также в составе покрытия такие состояния химических элементов, как: CF_x , CO_x , MF^* , MC^* , SiO , SiC , Mg^{2+} (М – металл), что указывает на образование различных веществ в результате ПЭО-процесса. Mg и Si являются легирующими элементами AMg_3 , тогда как С, О и F связаны с составом электролита. Наличие связи С–N в С 1s-спектрах также подтверждает импрегнацию покрытия ингибиторами азольной группы.

Методом *конфокальной рамановской микроспектроскопии* определен химический состав образцов КП-Т-24 и КП-Б-24. Этот метод в режиме сканирования исследуемого участка поверхности также позволяет на микроуровне определить распределение одного из компонентов, входящих в состав защитного слоя. Спектры комбинационного рассеяния снимали в диапазоне от 200 до 1300 см^{-1} (для образца КП-Б-24) и от 800 до 1600 см^{-1} (для образца КП-Т-24) с помощью конфокального спектрометра Alpha 500 (WITec, Ульм, Германия) и программного обеспечения WITec Control/Project Plus 2.1. Спектры записывались при использовании зеленого лазера (длина волны 532 нм) с мощностью излучения 30 мВт в течение 10 мин (накоплено 60 спектров). Распределение бензотриазола и 1,2,4-триазола по поверхности ПЭО-слоя представлено в виде 2D-карт интенсивности. Карты построены в результате сканирования выбранной зоны покрытия размером $25 \times 25\text{ мкм}$, содержащей 50×50 спектров. Время интегрирования при снятии спектра составляло 1 с.

Для подтверждения внедрения бензотриазола и 1,2,4-триазола в структуру ПЭО-покрытия были получены изображения исследуемого участка образца и карты распределения ингибиторов. Были сняты спектры комбинационного рассеяния порошков бензотриазола и 1,2,4-триазола, а также участков поверхности, соответствующих зонам с высокой и низкой концентрацией ингибитора в покрытии.

Спектр порошка бензотриазола содержит полосы, характерные для этого ингибитора (**рис. 4.6**). Зафиксирован интенсивный характеристический пик при 782 см^{-1} , отвечающий за так называемые «дышащие» колебания связей $\text{C}=\text{C}$ бензольного кольца. Пики при 1006 и 1022 см^{-1} связаны с деформационными колебаниями связей (вызванными растяжением скелетных связей $\text{C}=\text{C}$ в бензольном кольце, а также $\delta(\text{CH})$) [410,411]. Пики при 1095 и 1126 см^{-1} относятся к деформационным колебаниям $\delta(\text{NH})$ и $\delta(\text{CH})$ соответственно. Узкий пик при 1209 см^{-1} отвечает за комбинацию асимметричных валентных колебаний $\nu(\text{N}=\text{N}=\text{N})$ и деформационных колебаний $\delta(\text{NH})$. Пик при 632 см^{-1} описывает крутильные колебания связей триазольного цикла [410–412].

Спектр порошка 1,2,4-триазола отражает наличие полос, характерных для этого ингибитора (**рис. 4.7**). Сильный характеристический пик зарегистрирован при 1260 см^{-1} , он отвечает за валентные колебания двойной связи $\text{N}=\text{N}$ триазольного кольца $\nu(\text{N}=\text{N})$ [515]. Пик средней интенсивности при 1065 см^{-1} отвечает за комбинацию деформационных колебаний $\delta(\text{NH})$ и $\delta(\text{CH})$ [515,516]. Пик при 1302 см^{-1} связан с плоскостными деформационными колебаниями связей $\delta(\text{CH})$ [515,517]. Сильный пик при 1148 см^{-1} относится к валентным колебаниям одинарной связи $\text{N}=\text{N}$ триазольного цикла $\nu(\text{N}=\text{N})$ [516], возникающим в ходе таутомерных превращений. Пики при 1184 и 961 см^{-1} относятся к плоскостным деформационным колебаниям $\delta(\text{NNH})$ и $\delta(\text{NCN})$ соответственно

[515,518,519]. Пик при 1361 см^{-1} описывает растяжение связей 1,2,4-триазольного цикла [517], а пик при 979 см^{-1} – плоскостные деформационные колебания данного цикла [515]. Линия при 1380 см^{-1} связана с валентными колебаниями $\nu(C-N)$ [515,518].

Для установления интенсивности распределения бензотриазола и 1,2,4-триазола по поверхности образцов с покрытиями были построены с помощью фильтра 2D-карты в спектральном диапазоне, соответствующем наиболее интенсивным характеристическим пикам, а именно $750\text{--}810\text{ см}^{-1}$ для бензотриазола («дышащие» колебания связей $C=C$ бензольного кольца при 790 см^{-1}) и $1230\text{--}1290\text{ см}^{-1}$ для 1,2,4-триазола (валентные колебания двойной связи $N=N$ триазольного кольца $\nu(N=N)$). Оптическое изображение исследуемых участков покрытия и 2D-карты для бензотриазола и 1,2,4-триазола (рис. 4.6 и 4.7) свидетельствуют о распределении бензотриазола и 1,2,4-триазола по поверхности покрытия. Площадь светлых зон (участков с высокой концентрацией бензотриазола и 1,2,4-триазола) значительно превышает площадь темных участков. Мень-

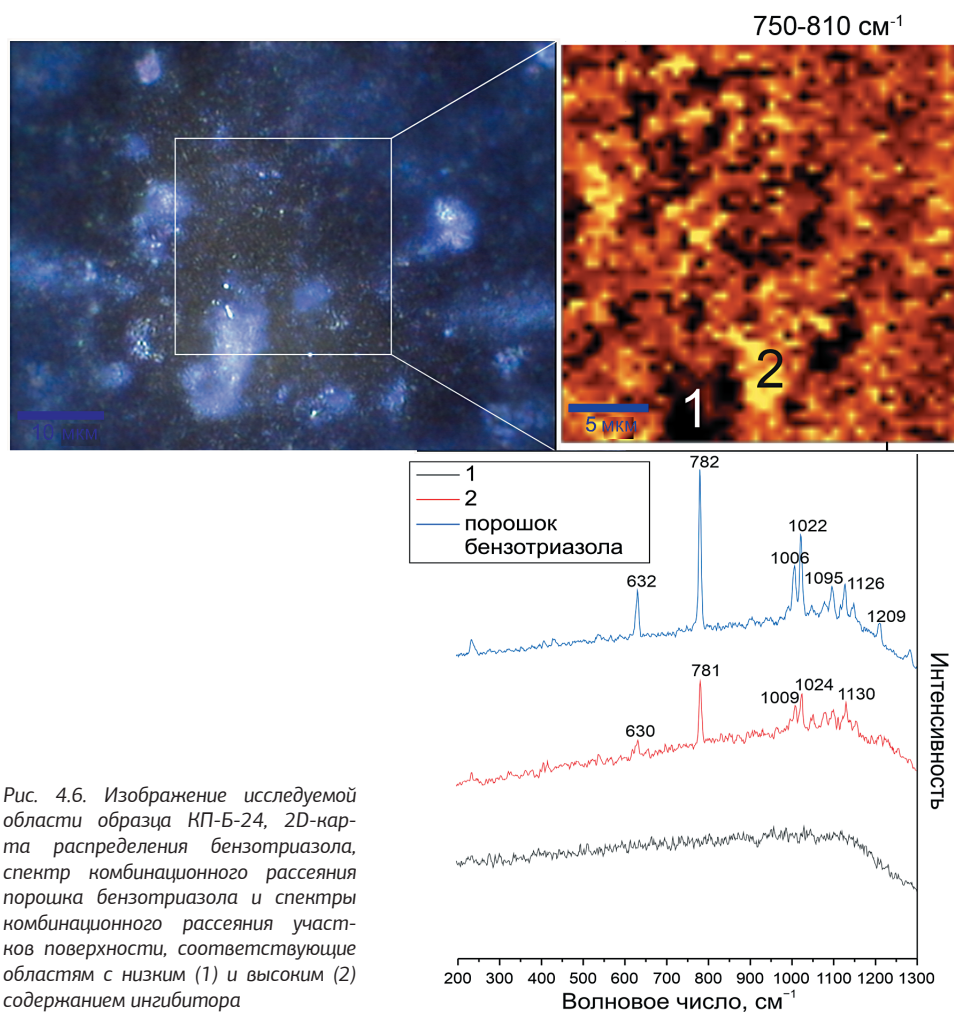


Рис. 4.6. Изображение исследуемой области образца КП-Б-24, 2D-карта распределения бензотриазола, спектр комбинационного рассеяния порошка бензотриазола и спектры комбинационного рассеяния участков поверхности, соответствующие областям с низким (1) и высоким (2) содержанием ингибитора

шая концентрация ингибитора, зафиксированная в темных областях, может быть связана со сложной морфологией покрытия и осаждением большей части ингибитора в порах защитного слоя.

В спектре КП-Б-24 четко видны полосы 630, 781, 1009, 1024 и 1130 см^{-1} , соответствующие колебаниям связей в бензотриазоле (рис. 4.6). В спектре КП-Т-24 наблюдаются полосы 929, 956, 1052, 1138, 1260, 1291, 1320 и 1364 см^{-1} , связанные с колебаниями связи в молекуле 1,2,4-триазола. Незначительный сдвиг пиков относительно чистого вещества, вероятно, обусловлен взаимодействием 1,2,4-триазола и веществ, входящих в состав ПЭО-слоя (рис. 4.7).

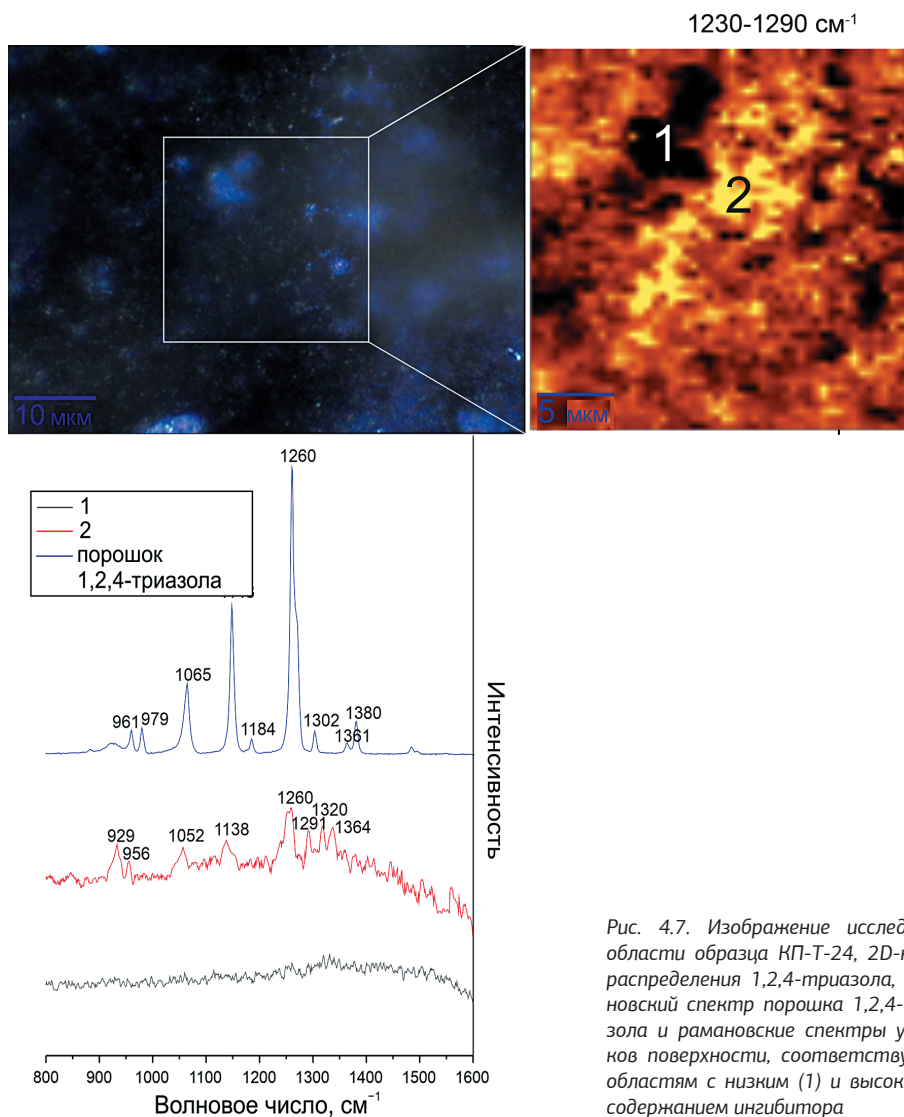


Рис. 4.7. Изображение исследуемой области образца КП-Т-24, 2D-карта распределения 1,2,4-триазола, рамановский спектр порошка 1,2,4-триазола и рамановские спектры участков поверхности, соответствующих областям с низким (1) и высоким (2) содержанием ингибитора

Антикоррозионные свойства покрытий

Уровень защитных свойств сформированных покрытий оценивали методом *электрохимической импедансной спектроскопии* (EIS). Исследования проводились с использованием системы 12558WB (Solartron Analytical, Великобритания), состоящей из электрохимического интерфейса SI 1287 и анализатора частотных характеристик FRA 1255B. Для измерений была использована трехэлектродная ячейка Model K0235 Flat (PAR, Ок-Ридж, Теннесси, США), включающая электрод сравнения – хлоридсеребряный электрод (Ag/AgCl) (потенциал относительно стандартного водородного электрода равен 0,197 В) и противоелектрод – платинированную ниобиевую сетку. Электролитом служил 3,5 масс.% раствор хлорида натрия. Площадь образца в электролите составляла 1 см². Перед EIS-измерениями образец выдерживали в электролите в течение 60 мин для стабилизации потенциала электрода. Импедансные спектры регистрировались в диапазоне частот от 1 МГц до 0,1 Гц с логарифмической разверткой 10 точек на декаду. Измерения EIS проводились в течение 24 ч выдержки образца в электролите. Спектры записывались каждые 2 ч.

На **рис. 4.8** представлены импедансные спектры (диаграммы Найквиста и Боде), отражающие коррозионное поведение сформированных поверхностных слоев после 1 ч выдержки в 3,5% растворе NaCl. EIS-спектры получены для образцов, выдержанных разное время в растворе с ингибитором: КП-Т-0,5/1/2/24 и КП-Б-0,5/1/2/24. Для сравнения представлен спектр образца с базовым ПЭО-слоем.

Изменение модуля импеданса $|Z|_{f=0,1\text{Гц}}$, измеренного на низкой частоте, в течение всего времени выдержки (24 ч) образцов с разными типами КП в растворе хлорида натрия, представлено на **рис. 4.9**.

Данные EIS обнаруживают рост значений модуля импеданса $|Z|$ во всем диапазоне частот с увеличением времени импрегнирования микротрубок ПЭО-покрытия (пористой части защитного слоя) ингибиторами коррозии азольной группы до 24 ч (рис. 4.8). Наилучшие антикоррозионные свойства наблюдаются у образца КП-Т-24, для которого значение модуля импеданса, измеренное на частоте 0,1 Гц ($|Z|_{f=0,1\text{Гц}} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), увеличивается в 36 раз по сравнению с базовым ПЭО-покрытием ($|Z|_{f=0,1\text{Гц}} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) (рис. 4.8а, 4.9а; **табл. 4.2**). Пропитка ПЭО-покрытия бензотриазолом также положительно влияет на уровень антикоррозионной защиты полученных поверхностных слоев. Наилучшие защитные свойства среди бензотриазолсодержащих КП установлены для образца КП-Б-24 (рис. 4.8б, 4.9б; **табл. 4.2**). Значение модуля импеданса, измеренное на низкой частоте, для этого типа покрытия более чем в 20 раз превышает величину данного параметра для базового ПЭО-покрытия ($2,7 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ против $1,3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$). Повышение антикоррозионных свойств образцов после формирования азолсодержащего композиционного покрытия подтверждается также значительным увеличением диаметра полуокружности на диаграмме Найквиста (рис. 4.8 а1, б1).

Исследование коррозионного поведения 1,2,4-триазол- и бензотриазолсодержащих покрытий, проведенное методом EIS (рис. 4.9), показало, что оптимальным и достаточно временем импрегнирования микротрубок ПЭО-покрытия для наиболее полного заполнения ингибитором коррозии является 24 ч. Высокий уровень защитных свойств образцов с композиционными покрытиями КП-Т-24 и КП-Б-24 сохраняется в течение 24 ч выдержки в 3,5% растворе по сравнению с другими типами покрытий (рис. 4.9). Пропитка в течение 0,5, 1 и 2 ч образца с ПЭО-покрытием раствором ингибитора также

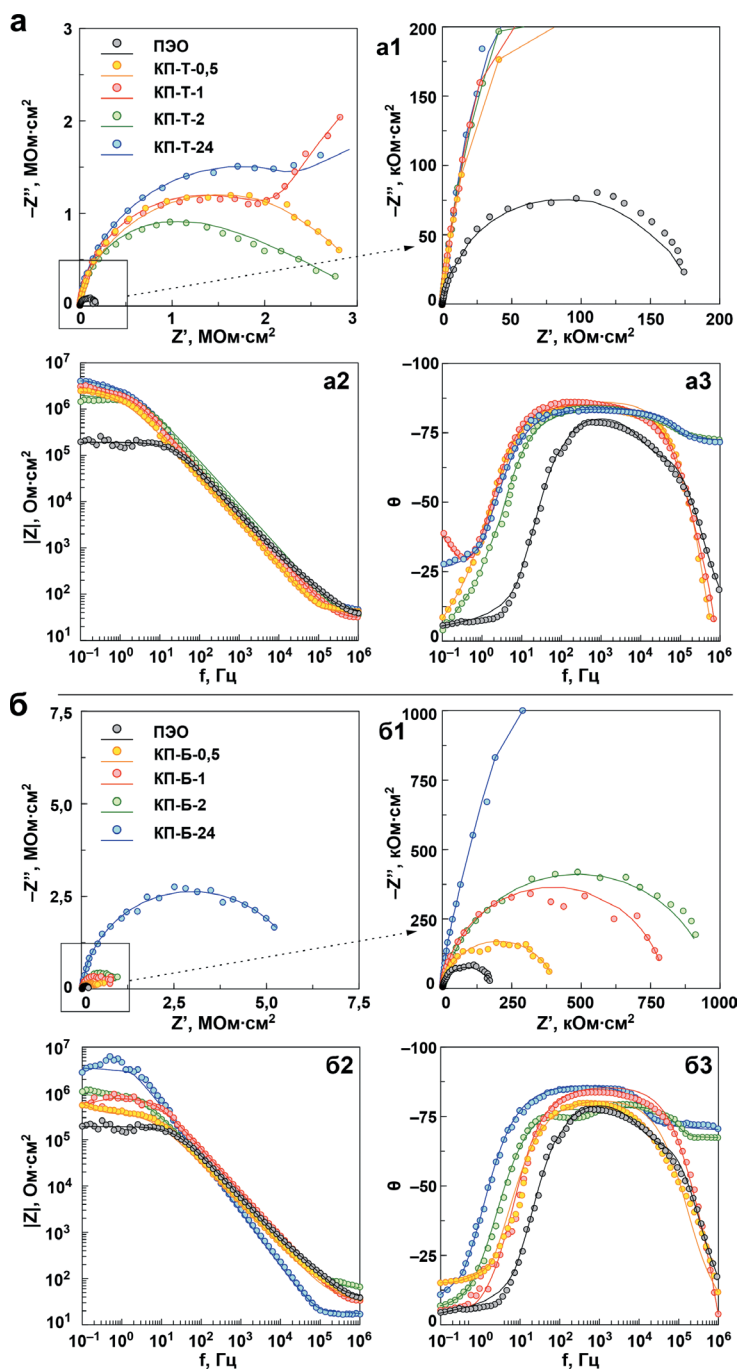


Рис. 4.8. Диаграммы Найквиста (а1, б1) и Боде (а2, б2), (а3, б3) для образцов с 1,2,4-триазол- (а) и бензотриазолсодержащими покрытиями (б) после 1 ч выдержки в 3,5% растворе NaCl

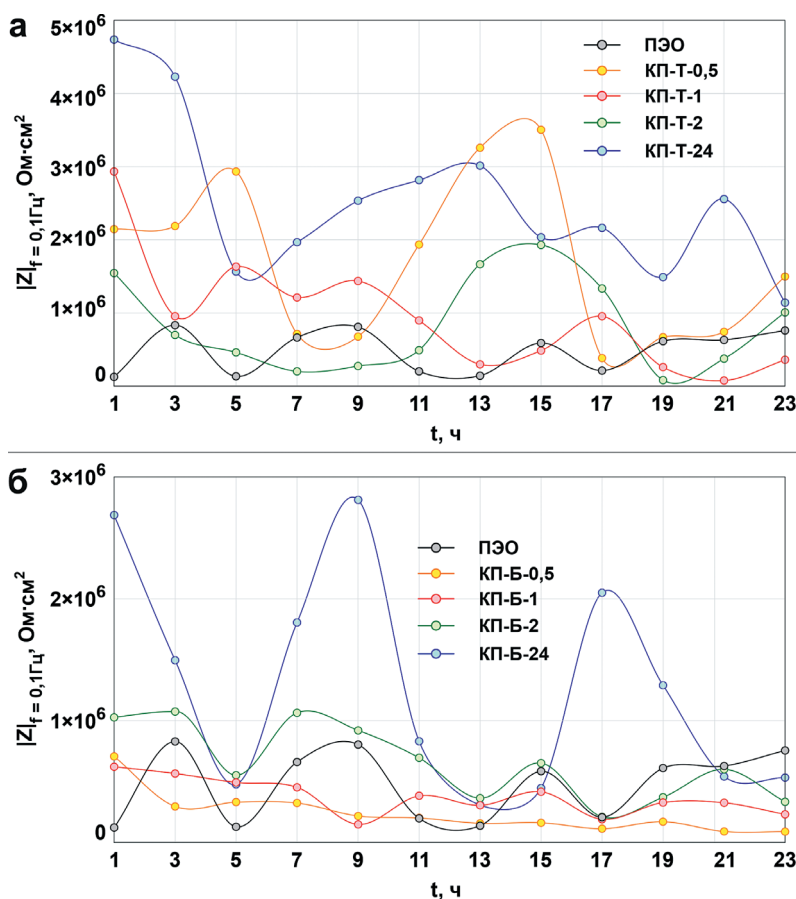


Рис. 4.9. Изменение значений $|Z|_{f=0,1\text{Гц}}$ для образцов с покрытиями, содержащими 1,2,4-триазол (а) и бензотриазол (б), в течение 24 ч выдержки в 3,5% растворе NaCl

приводит к повышению коррозионной стойкости по сравнению с базовым ПЭО-слоем. Вероятно, это связано с образованием азолсодержащих комплексных соединений с материалом подложки и ПЭО-слоем.

Данные, представленные на рис. 4.9, свидетельствуют о том, что изменение значений $|Z|_{f=0,1\text{Гц}}$ во времени выдержки образцов с различными поверхностными слоями в 3,5% NaCl имеет волнообразный характер. Для ПЭО-покрытия такое поведение объясняется возможной частичной деградацией образовавшегося оксидного слоя и формированием продуктов коррозии. Для композиционных покрытий, содержащих ингибитор, рост и снижение значения модуля импеданса, измеренного на низкой частоте, могут указывать на свойства самовосстановления защитных слоев. Подобный волнообразный тренд изменения $|Z|_{f=0,1\text{Гц}}$ ранее был отмечен в данной монографии для ингибиторсодержащих покрытий, сформированных на магниевых сплавах (например, для стеарат- и церийсодержащих композиционных и гибридных покрытий на сплаве МА8: КП-СВЭ, ГП-1СП, ГП-2СП, КП-НЦ01, ГП-НЦ01), и был отнесен к эффекту самовосстановления.

Таблица 4.2

Расчетные параметры элементов ЭЭС для образцов алюминиевого сплава АМгЗ с базовым и композиционными защитными покрытиями

Образец	CPE_1		$R_1, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	CPE_2		$R_2, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	$Z _{f=0,1\Gamma\text{ц}}, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$
	$Q_1, \text{См}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^n$	n		$Q_2, \text{См}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^n$	n		
ПЭО	$4,8\cdot 10^{-8}$	0,91	$1,1\cdot 10^3$	$1,6\cdot 10^{-8}$	0,93	$1,7\cdot 10^5$	$1,3\cdot 10^5$
КП-Т-0,5	$4,2\cdot 10^{-8}$	0,96	$8,8\cdot 10^5$	$7,9\cdot 10^{-8}$	0,63	$2,3\cdot 10^6$	$2,1\cdot 10^6$
КП-Т-1	$4,6\cdot 10^{-8}$	0,95	$2,5\cdot 10^6$	$5,8\cdot 10^{-7}$	0,97	$6,3\cdot 10^6$	$2,9\cdot 10^6$
КП-Т-2	$4,1\cdot 10^{-8}$	0,94	$2,7\cdot 10^6$	$7,0\cdot 10^{-7}$	0,98	$6,2\cdot 10^6$	$1,5\cdot 10^6$
КП-Т-24	$4,1\cdot 10^{-8}$	0,94	$2,9\cdot 10^6$	$1,5\cdot 10^{-7}$	0,31	$8,0\cdot 10^6$	$4,7\cdot 10^6$
КП-Б-0,5	$9,4\cdot 10^{-8}$	0,90	$1,9\cdot 10^5$	$1,2\cdot 10^{-7}$	0,57	$2,0\cdot 10^5$	$7,1\cdot 10^5$
КП-Б-1	$1,1\cdot 10^{-7}$	0,88	$2,1\cdot 10^4$	$1,0\cdot 10^{-8}$	0,87	$4,4\cdot 10^5$	$5,7\cdot 10^5$
КП-Б-2	$7,3\cdot 10^{-8}$	0,89	$3,6\cdot 10^5$	$2,4\cdot 10^{-8}$	0,94	$6,3\cdot 10^5$	$1,1\cdot 10^6$
КП-Б-24	$2,8\cdot 10^{-8}$	0,95	$4,0\cdot 10^6$	$8,7\cdot 10^{-8}$	0,26	$2,1\cdot 10^6$	$2,7\cdot 10^6$

Диаграммы Боде для ПЭО и всех типов композиционных азолсодержащих покрытий характеризуются наличием двух временных констант (рис. 4.8 а2, б2). Следовательно, аппроксимация импедансных спектров проводилась с использованием эквивалентной электрической схемы (ЭЭС) с двумя последовательно-параллельными R – CPE -цепочками (рис. 4.10а; табл. 4.2). Применение элемента постоянного сдвига фазы (CPE) вместо C (идеальной емкости) является следствием неоднородности покрытий. R_1 – CPE_1 характеризует резистивную составляющую (R_1) внешней (пористой) части ПЭО-слоя или покрытия, обработанного ингибитором, а также геометрическую емкость (CPE_1) всего поверхностного слоя. Элементы R_2 и CPE_2 описывают резистивную и емкостную составляющие внутреннего (беспористого) подслоя покрытия, включающего ингибитор, осажденный на дне пор.

Следует отметить, что образцы с 1,2,4-триазолсодержащими композиционными покрытиями показали большие значения R_1+R_2 и $|Z|_{f=0,1\Gamma\text{ц}}$, чем бензотриазолсодержащие

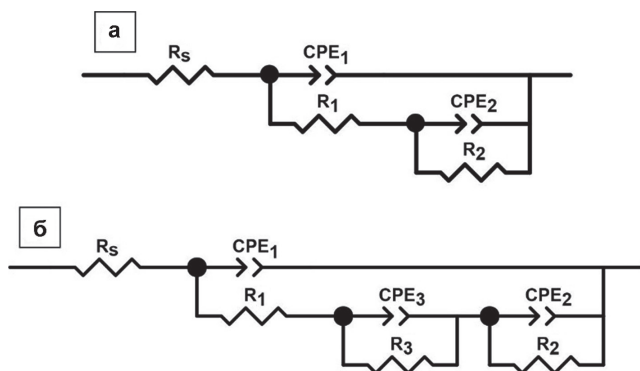


Рис. 4.10. Эквивалентные электрические схемы, используемые для моделирования импедансных спектров ПЭО-, композиционных (а) и гибридных покрытий (б)

защитные слои, сформированные при соответствующей продолжительности импрегнации (табл. 4.2). Можно предположить, что это связано с размером молекул. Бензольная часть молекулы бензотриазола может экранировать его реакционные центры и создавать стерические затруднения, приводящие к уменьшению количества адсорбированных молекул. А меньший размер молекулы 1,2,4-триазола позволяет адсорбировать большее количество молекул и способствует повышению защитных свойств композиционных покрытий.

Для улучшения защитных свойств образцов, а также продления эффекта самовосстановления образцы с композиционными ингибиторсодержащими покрытиями, обладающими лучшими антикоррозионными свойствами (КП-Т-24, КП-Б-24), были обработаны полимером ПВДФ. Затем полученные гибридные образцы ГП-Т-24-П и ГП-Б-24-П были исследованы методом EIS (рис. 4.11).

Импедансные спектры, представленные на рис. 4.11 в виде диаграмм Найквиста и Боде, отражают коррозионное поведение сформированных поверхностных слоев

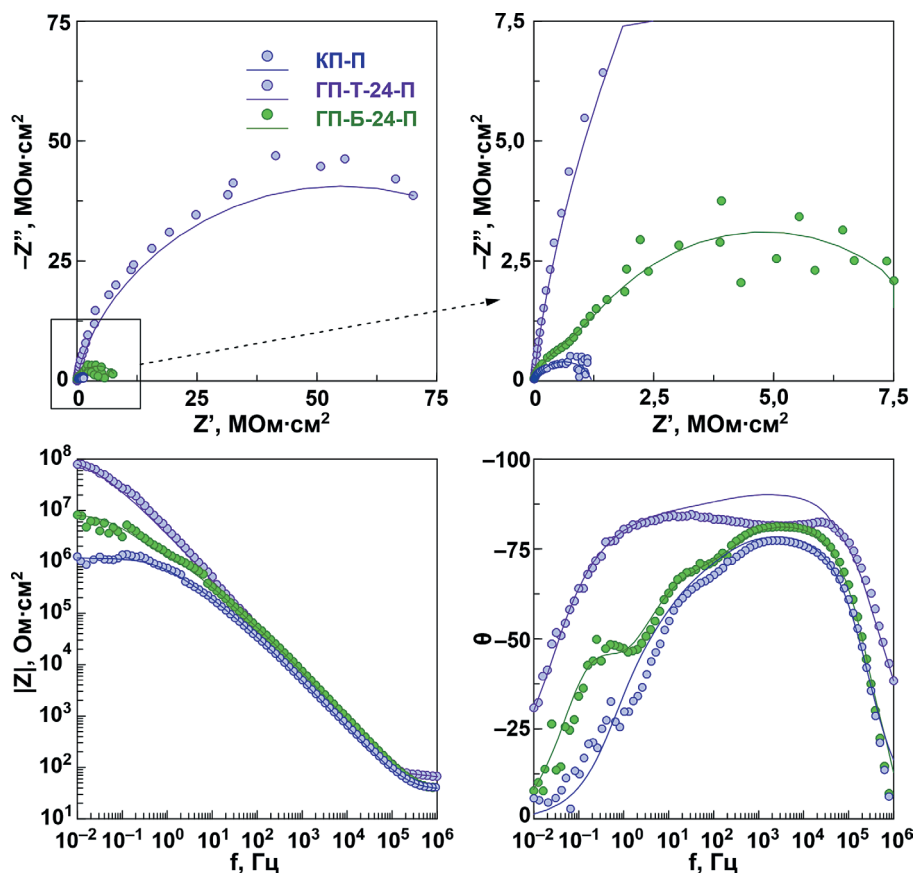


Рис. 4.11. Диаграммы Найквиста и Боде для композиционного покрытия без ингибитора и двух типов гибридных покрытий после 1 ч выдержки в 3,5% растворе NaCl

гибридных покрытий после 1 ч выдержки в 3,5% растворе NaCl. Значение $|Z|_{f=0,1\Gamma\text{ц}}$ для образца ГП-Т-24-П ($2,7 \cdot 10^7$ Ом·см²) увеличивалось более чем на 2 порядка по сравнению с базовым ПЭО-слоем ($1,3 \cdot 10^5$ Ом·см²), более чем на порядок по сравнению с образцом КП-П ($1,0 \cdot 10^6$ Ом·см²) и в 6 раз по сравнению с КП-Т-24 ($4,7 \cdot 10^6$ Ом·см²). Для образца ГП-Б-24-П значение $|Z|_{f=0,1\Gamma\text{ц}}$ ($4,8 \cdot 10^6$ Ом·см²) в 37, 5 и 2 раза выше, чем для образцов с ПЭО-покрытием, КП-П и КП-Б-24 ($2,7 \cdot 10^6$ Ом·см²) соответственно (рис. 4.11; табл. 4.2, 4.3). Самые высокие антикоррозионные свойства, как видим, у образца ГП-Т-24-П.

Спектры на диаграмме Бode для образцов КП-П, ГП-Т-24-П и ГП-Б-24-П характеризуются наличием трех временных констант. Поэтому аппроксимацию полученных спектров осуществляли с помощью эквивалентной электрической схемы с тремя последовательно-параллельными цепочками $R-CPE$ (рис. 4.10б; табл. 4.3). Для указанных трех типов покрытий R_1 характеризует коррозионную стойкость верхнего полимерсодержащего слоя, сформированного на поверхности и пористой части покрытия и способствующего частичной герметизации микроконтейнеров с ингибитором; CPE_1 учитывает емкостную составляющую всего композиционного покрытия. Элементы R_2-CPE_2 отвечают за внутренний (беспористый) подслой ПЭО-покрытия, а R_3-CPE_3 используются для описания пористой части ПЭО-слоя, пропитанной бензотриазолом или 1,2,4-триазолом. Изменение параметра R_1 , R_2 и R_3 (сопротивление верхнего слоя, внутреннего слоя и пористой части гибридного покрытия соответственно) также свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости образца с гибридным 1,2,4-триазолсодержащим покрытием по сравнению с образцом ГП-Б-24-П.

Таблица 4.3

Расчетные параметры элементов ЭЭС для исследуемых электрохимическими методами образцов алюминиевого сплава АМг3

Образец	CPE_1		R_1 , Ом·см ²	CPE_2		R_2 , Ом·см ²	CPE_3		R_3 , Ом·см ²	$ Z _{f=0,1\Gamma\text{ц}}$, Ом·см ²
	Q_1 , См·см ⁻² ·с ⁿ	n		Q_2 , См·см ⁻² ·с ⁿ	n		Q_3 , См·см ⁻² ·с ⁿ	n		
ГП-Т-24-П	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0,97	$5,1 \cdot 10^5$	$4,3 \cdot 10^{-8}$	0,71	$7,9 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^{-8}$	0,62	$3,4 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$
ГП-Б-24-П	$3,8 \cdot 10^{-8}$	0,94	$1,2 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,83	$7,5 \cdot 10^6$	$9,3 \cdot 10^{-8}$	0,70	$1,2 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^6$
КП-П	$7,7 \cdot 10^{-8}$	0,89	$1,0 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,68	$2,7 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,74	$8,1 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$

Защитные свойства сформированных поверхностных слоев сопоставимы с результатами, полученными различными научными группами, которые занимаются формированием базовых и модифицированных ПЭО-покрытий на сплавах алюминия. Согласно анализу литературных данных, значения модуля импеданса, измеренного на низкой частоте ($|Z|_{f=0,1\Gamma\text{ц}}$ или $|Z|_{f=0,01\Gamma\text{ц}}$), а также поляризационное сопротивление для образцов с защитными покрытиями, представленные в работах [473,474,482–484,487,489], варьируют в диапазоне от 10^3 до 10^7 Ом·см². Эти параметры указывают на высокую коррозионную стойкость гибридных покрытий, сформированных и исследованных в нашей работе. Следует отметить, что защитные покрытия, полученные коллективом авторов данной книги, за счет импрегнирования ингибитором могут обеспечить активную защиту от коррозии обрабатываемого алюминиевого сплава.

Прецизионная оценка электрохимической активности образцов с покрытиями. Коррозионное поведение исследованных образцов на микроуровне оценивалось с помощью локальных сканирующих электрохимических методов. Методом SVET (сканирующий вибрирующий электрод) фиксировались изменения локальной плотности тока, возникающие из-за разницы гальвани-потенциалов в микрогальванических ячейках, образующихся в результате неоднородности фазового состава материала. Методом SIET (сканирующий ионоселективный электрод) определялось локальное изменение концентрации ионов (H^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ и др.) в растворе вблизи поверхности образца.

SVET-измерения проводились с использованием вибрирующего Pt-Ir электрода. Платиновая чернь наносилась на сферический кончик электрода диаметром 10 мкм. Вибрации зонда осуществлялись по осям x и z относительно исследуемой поверхности с частотой 128 Гц (x) и 325 Гц (z). Амплитуда составляла 25 мкм. Для расчета плотности тока коррозии учитывалась только вертикальная ось вибрации (ось z).

SIET-измерения проводили с использованием микроэлектрода, состоящего из стеклянного капилляра (наружный диаметр 1,5 мм, диаметр конического кончика $2,0 \pm 0,5$ мкм) и серебряной проволоки, покрытой хлоридом серебра (Ag)/AgCl, в качестве внутреннего электрода сравнения. Кончик капилляра был заполнен водородселективной (H^+) мембраной Hydrogen ionophore II-cocktail A от Selectophore, США (длина колонки 60–70 мкм), а остальная часть пространства капилляра была заполнена внутренним буферным раствором (0,01 М KH_2PO_4 в 0,1 М KCl). Сканирующий ионоселективный электрод располагался на расстоянии 40 ± 5 мкм от поверхности образца. Его положение относительно сканирующего вибрирующего зонда описывалось координатами 40, 20 и 40 мкм по осям x , y и z соответственно. Дрейф потенциала во время теста измеряли с помощью pH-метра Sentron-SI с электродом MiniFET (pH-электрод, #9202-010, SENTRON Europe B.V., Нидерланды). Помимо установленных SVET/SIET-микроэлектродов в состав системы входит внешний хлоридсеребряный (Ag/AgCl) электрод сравнения.

Эксперименты проводились в 0,05 М растворе NaCl из-за лучшего соотношения сигнал/шум. Калибровку SIET-электрода осуществляли по уравнению Нернста с использованием буферных растворов. Угол наклона нернстовской зависимости составлял $57 \pm 0,6$ мВ·рН⁻¹. Локальные электрохимические измерения контролировались с помощью программного обеспечения ASET 2.0 (ScienceWares, США). Для измерения потенциала использовался предусилитель с входным сопротивлением 1 ПОм.

Для изучения влияния ингибитора на процесс коррозии были проведены квазисовременные SVET/SIET-измерения образцов с ПЭО-слоем, КП-Б-24 и КП-Т-24. На **рисунках 4.12а и 4.13** представлены карты локального распределения плотности тока и рН по сканируемой площади исследуемых образцов через 1 ч и 24 ч выдержки в 0,05 М растворе NaCl. Сканируемая область выделяется на рисунках рамкой.

По SVET/SIET-данным, коррозионный процесс образца с ПЭО-покрытием развивается в течение первого часа выдержки в агрессивной среде (рис. 4.12а и 4.13). Образование анодных зон (желтые и красные области, представленные на картах) с более высокими значениями анодного тока и меньшими значениями рН связано с реакциями растворения и гидролиза алюминия, характерными для коррозии этого материала [125].

Дальнейшее воздействие агрессивной среды характеризуется увеличением как локальной плотности тока, так и значений рН (рис. 4.12 и 4.13, 24 ч). Это объясняется воз-

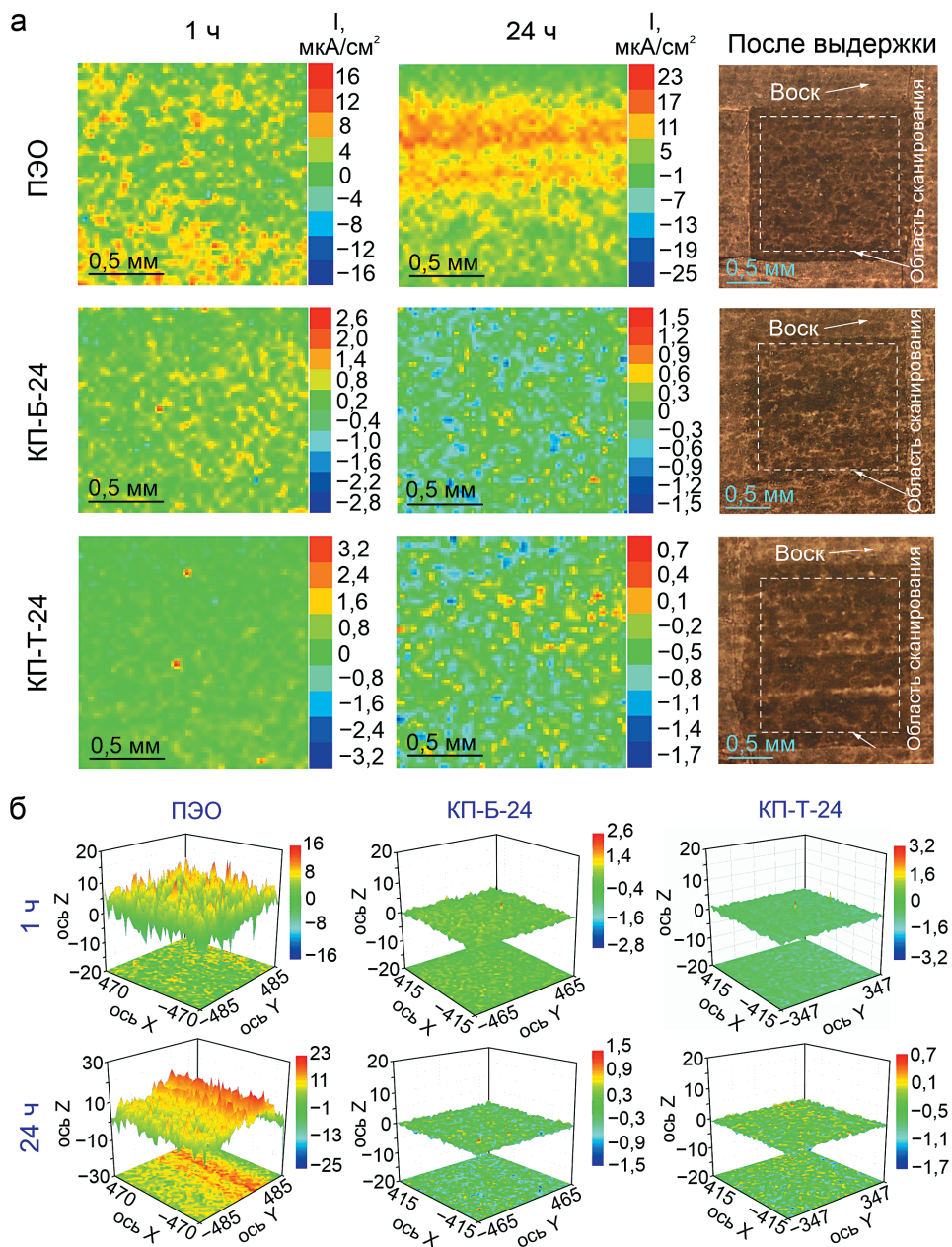


Рис. 4.12. (а) SVET-карты (цветная шкала отображает локальную плотность тока в мкА/см^2) и оптические изображения сканированных участков образцов с разными типами покрытий. (б) 3D-карты интенсивности локальной электрохимической активности образцов, представленные в едином масштабе

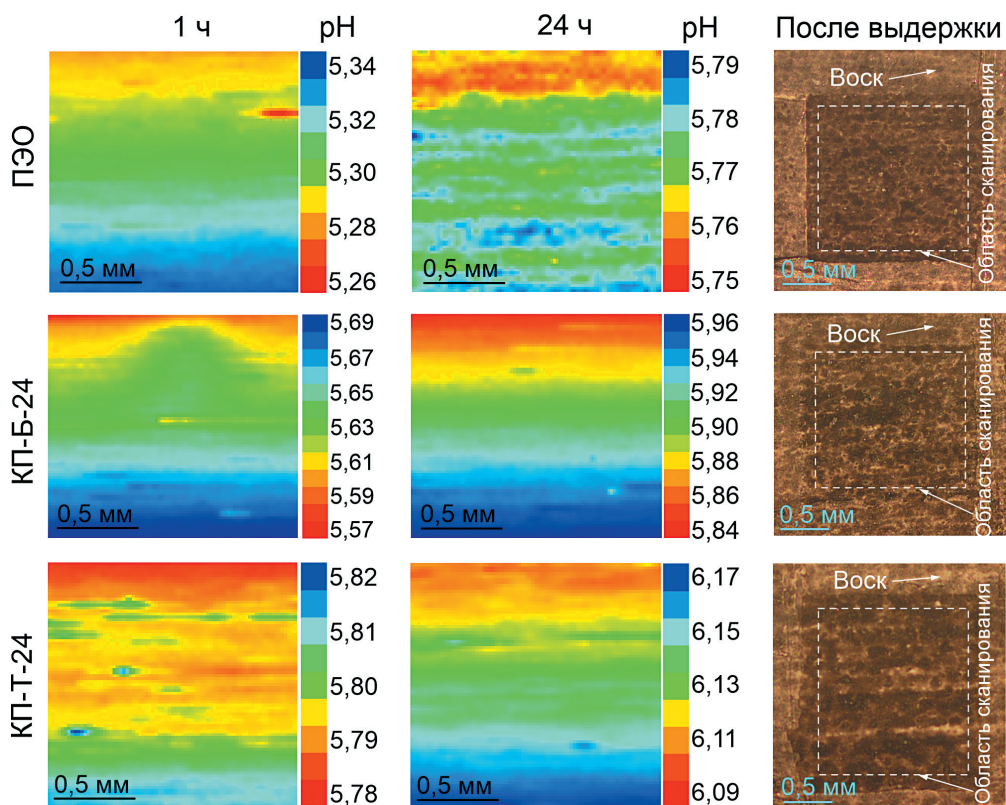


Рис. 4.13. SIET-карты распределения pH и оптические изображения сканированных участков образцов с разными типами покрытий

можной частичной деградацией защитного слоя с последующим растворением магния, присутствующего в составе подложки. Поскольку магний является очень активным металлом и процесс его коррозии сопровождается интенсивным повышением водородного показателя [24,520], его присутствие в составе сплава оказывает существенное влияние на коррозионную картину при увеличении времени выдержки [100,521] (рис. 4.13).

Пропитка микроконтейнеров ПЭО-слоя ингибиторами коррозии 1,2,4-триазолом и бензотриазолом существенно снижает уровень электрохимической активности исследуемых образцов. Стабилизация коррозионного поведения выражается меньшими значениями локальной плотности тока для образцов КП-Б-24 и КП-Т-24, а также более высокими локальными значениями pH (по сравнению с базовым ПЭО-слоем) после 24 ч выдержки в растворе хлорида натрия (рис. 4.12 и 4.13). Полученный результат является следствием эффекта самовосстановления сформированных композиционных покрытий. Менее интенсивное снижение значения pH по сравнению с образцом, не содержащим ингибитора, и приближение показателя к нейтральному исходному значению свидетельствует о низкой интенсивности коррозионного процесса образцов с композиционным покрытием (рис. 4.12 и 4.13). Следует отметить, что для образца КП-Т-24 после 24 ч выдержки значения pH сместились ближе к значениям, характерным для 0,05 М

раствора NaCl (около $\text{pH} = 7,0$). На рис. 4.12б представлены 3D-карты распределения плотности тока по поверхности образца. Карты показаны в одном масштабе для более удобного сравнения уровня защитных свойств образцов с покрытиями. Эти результаты наглядно демонстрируют более высокую коррозионную стойкость КП-Б-24 и КП-Т-24 по сравнению с базовым ПЭО-слоем. На основании комплексного анализа представленных данных можно сделать вывод, что образцы КП-Т-24 демонстрируют лучшие антикоррозионные свойства среди всех исследованных поверхностных слоев. SVET/SIET-результаты согласуются с данными, полученными методом электрохимической импедансной спектроскопии.

Адгезионные свойства поверхностных слоев

Адгезию ингибиторсодержащего ПЭО-покрытия, обработанного ПВДФ, изучали с помощью скретч-теста. Измерения проводили с помощью прибора Revetest Scratch Tester (CSM Instruments, Швейцария) с использованием алмазного индентора Rockwell. Нагрузку увеличивали от 1 до 100 Н со скоростью 12 Н/мин. Длина дорожки составляла около 5 мм.

Анализ оптического изображения и данных акустической эмиссии (рис. 4.14) показал, что индентор процарапал образец ГП-Т-24-П при нагрузке $L_{C3} = 83 \pm 3$ Н (L_{C3} – нагрузка, при которой покрытие стирается до металлической подложки). Первые признаки разрушения защитного слоя наблюдаются при $L_{C2} = 77 \pm 3$ Н (рис. 4.14). Эти результаты свидетельствуют о высоких механических характеристиках и адгезии гибридного покрытия, содержащего ингибитор коррозии и полимер.

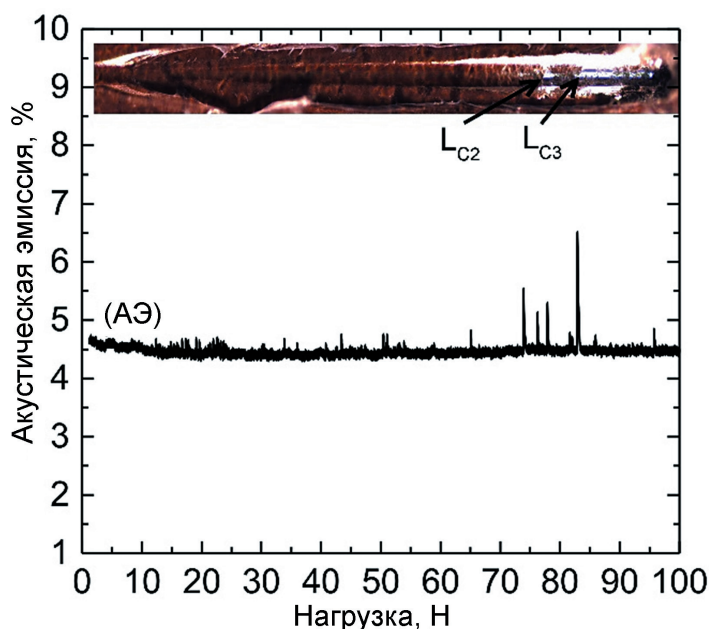


Рис. 4.14. Фотография образца ГП-Т-24-П после скретч-теста и зависимость акустической эмиссии от приложенной нагрузки

4.1.2 Механизм ингибирования коррозии сплава алюминия с триазолсодержащим покрытием

Механизм ингибирования коррозии алюминиевого сплава АМгЗ в агрессивной хлоридсодержащей среде представлен на схеме (рис. 4.15). В качестве примера ингибитора коррозии, введенного в поры ПЭО-покрытия, использовался бензотриазол. Предположительно, ингибирование коррозии алюминия азолами, входящими в состав ПЭО-покрытия, включает следующие стадии:

1. Активная физическая адсорбция триазолов на поверхности ПЭО-покрытия за счет высокого сродства алюминия и магния (который является основным легирующим элементом в сплаве АМгЗ) к азоту (рис. 4.15, стадия I). На первом этапе агрессивные хлорид-ионы могут быть захвачены ингибитором коррозии с образованием соединения 4,5,6,7-тетрахлоро-1Н-1,2,3-бензотриазол (как представлено на рис. 4.15) [522].

2. Формирование защитной коллоидно-дисперсной пленки ингибитора коррозии (рис. 4.15, II стадия).

3. Формирование на поверхности химических соединений. Триазолы могут выступать лигандами алюминия (в местах поврежденной или деградированной части ПЭО-слоя и зонах сплава без покрытия) с последующим образованием металлорганического соединения (рис. 4.15, стадия III).

Следует отметить, что в процессе хемосорбции, реализуемой на третьем этапе, ингибитор коррозии может образовывать азолсодержащие комплексные соединения не только с металлом, растворяющимся из материала подложки, но и с компонентами, входящими в состав ПЭО-слоя.

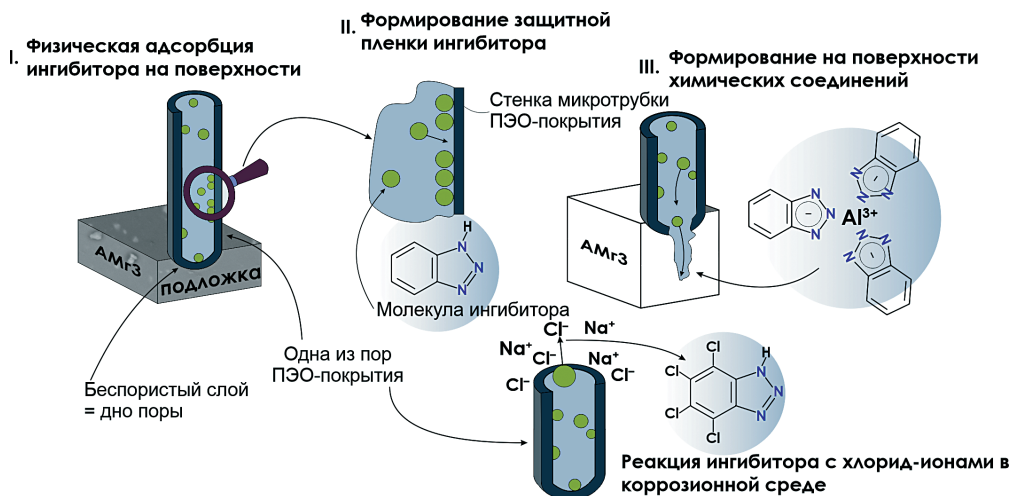


Рис. 4.15. Механизм защиты от коррозии образца алюминиевого сплава с азолсодержащим ПЭО-слоем в присутствии хлорид-ионов. В качестве примера действия ингибитора коррозии использован бензотриазол

Таким образом, предложен и оптимизирован способ повышения защитных свойств алюминиевого сплава АМгЗ путем формирования гибридных ингибиторсодержащих покрытий на основе оксидного ПЭО-слоя с самоорганизованной микротрубчатой структурой.

Выбран оптимальный способ пропитки матрицы ПЭО-покрытия органическими ингибиторами коррозии – бензотриазолом и 1,2,4-триазолом (24-часовая выдержка в 0,05 М растворе). Подтверждено наличие ингибитора коррозии в микротрубках ПЭО-покрытия и установлено их распределение в составе поверхностного слоя.

Обработка полученных композиционных покрытий полимерным материалом – поливинилиденфторидом методом распыления позволяет продлить действие активной антикоррозионной защиты материала подложки и обеспечить контролируемое высвобождение ингибирующих агентов из пор-микрореконтейнеров ПЭО-покрытия.

Наилучшую коррозионную стойкость показал образец с гибридным 1,2,4-триазолсодержащим покрытием ($|Z|_{f=0,1\text{Гц}} = 2,7 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$). Защитные свойства поверхностных слоев сопоставимы с результатами различных научных групп, занимающихся формированием базовых и модифицированных ПЭО-покрытий на сплавах алюминия. Более того, гибридные слои, полученные в данной главе, обладают высокой адгезией к подложке и могут обеспечить активную защиту алюминиевого сплава от коррозии.

Пропитка микротрубок ПЭО-покрытия бензотриазолом и 1,2,4-триазолом приводит к значительному снижению локальной электрохимической активности, оцениваемой на микроуровне. Обнаружены более низкие значения локальной плотности тока и более высокие значения pH (по сравнению с зарегистрированными значениями для образца с ПЭО-слоем, не содержащим ингибитора) в растворе вблизи исследуемой поверхности.

На основе результатов комплексного анализа защитных свойств формируемых поверхностных слоев предложен механизм ингибирования коррозии гибридного ингибитор- и полимерсодержащего покрытия. Результаты данной работы полезны для лучшего понимания коррозионного поведения алюминия и его сплавов и разработки эффективного метода антикоррозионной защиты перспективных конструкционных материалов.

Заключение

В книге рассмотрены и проанализированы результаты современных достижений в области разработки способов формирования гибридных (имеющих в структуре несколько составляющих различной химической природы) антикоррозионных покрытий нового поколения с функцией самозалечивания на поверхности магниевых и алюминиевых сплавов для расширения области практического применения материала в различных областях науки, технике и медицине. Предлагаемый в монографии природоподобный подход к формированию многофункциональных слоев основывается на выборе эффективных ингибиторов методом *in situ* – с использованием комплекса локальных сканирующих методов, необходимых для анализа и контроля уровня усиления антикоррозионного действия гибридных smart-покрытий на сплавах.

Резюмируя изложенное в книге, подведем основные итоги исследования.

1. Представлена новая методика, позволяющая выбрать наиболее эффективный для защиты материала ингибитор коррозии, что необходимо для успешного формирования гибридных smart-покрытий на базе плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). С помощью традиционных и локальных сканирующих электрохимических исследований, наряду с волюмометрическим и гравиметрическим методами определения скорости коррозионной деградации, проведен скрининг ингибиторов коррозии, заключающийся в оценке возможности использования карбоксилатов: фумарата натрия, гликолята натрия и глюконата натрия для подавления процесса коррозии магниевых сплавов (на примере сплава МА8, система Mg–Mn–Ce, и сплава Mg–0,8Ca). Проведен детальный анализ сформированного слоя продуктов коррозии и кинетики образования поверхностной пленки в ингибиторсодержащих растворах. Добавление фумарата и гликолята натрия в 0,9% раствор NaCl способствует формированию более коррозионностойкой оксидной пленки. Скорость коррозии образцов магниевого сплава в хлоридсодержащей среде в присутствии ингибиторов коррозии снижалась в 5–8 раз. Максимальная эффективность ингибитора при подавлении процесса коррозии может достигать 81 % (при использовании фумарата натрия). Установлена возможность использования для сплавов магния выбранных ингибиторов для снижения интенсивности разрушающего действия хлоридсодержащей среды. Предложен механизм антикоррозионной защиты, основанный на формировании оксидно/гидроксидного слоя и сорбции органических ингибиторов, препятствующих адсорбции на поверхности материала хлорид-ионов и дальнейшему процессу деградации материала. Определена высокая совместимость матрицы кальций-фосфатного ПЭО-покрытия с исследуемыми ингибиторами коррозии. Наибольшее повышение защитных свойств поверхностного слоя было зафиксировано для образца в фумаратсодержащем растворе. Таким образом, сделан шаг вперед в разра-

ботке принципов управления скоростью резорбции магниевых сплавов для последующего использования материала в медицине.

2. Разработаны новые способы модификации поверхности биорезорбируемых магниевых сплавов систем Mg–Mn–Ce, Mg–Ca посредством формирования ингибитор- и полимерсодержащих покрытий нового типа с целью снижения интенсивности, повышения равномерности коррозионной деградации материала и возможности его пролонгированного практического использования в сфере имплантационной хирургии. Подобраны электролитические системы и режимы для проведения плазменного электролитического оксидирования с целью формирования антикоррозионных биологически активных покрытий на магниевых сплавах. Отработаны способы импрегнирования пористой части поверхностного слоя ПЭО-покрытия ингибитором (на примере 8-оксихинолина) и способы запечатывания пор, содержащих ингибитор, полимерами (на примере биоинертных полимерных материалов ультрадисперсного политетрафторэтилена и поливинилиденфторида, а также биорезорбируемого полимера – поликапролактона (ПКЛ)). Дополнительная обработка покрытия полимером не только не снижает активность 8HQ, но и приводит к образованию надежного барьера, предотвращающего быстрый самопроизвольный выход ингибитора, не связанный с коррозионным процессом. Эффективное действие ингибитора в составе таких покрытий может достигать 99 %. Импрегнирование ПЭО-слоя 8-оксихинолином приводит к формированию антибактериального покрытия на сплаве Mg, что увеличивает потенциал применения данного материала в ортопедии за счет снижения частоты имплантат-ассоциированных инфекций.

3. На примере стеариновой кислоты и нитрата церия экспериментально подобран и оптимизирован способ импрегнирования пор ПЭО-слоя ингибитором, обеспечивающий наиболее полное заполнение пор гетерооксидной матрицы защитным агентом, с целью снижения электрохимической активности обрабатываемого материала. Представлены способы создания гибридных покрытий путем последовательной импрегнации базового ПЭО-слоя стеариновой кислотой и ПКЛ, а также одностадийным нанесением ПКЛ и ингибитора из раствора на основе дихлорметана. Установлена оптимальная концентрация ингибитора коррозии в составе сформированных гибридных церийсодержащих слоев, поры которых были запечатаны ПКЛ. Показано, что материалы с данными типами покрытий характеризуются низкой электрохимической активностью, наилучшей устойчивостью к воздействию агрессивной среды, стабильностью обеспечения активной антикоррозионной защиты, а также наиболее эффективно проявляют свойства самозалечивания.

Описан на микроуровне с использованием методов SVET и SIET механизм локального коррозионного поведения образцов с различными типами покрытий. Определена интенсивность электрохимических процессов, протекающих на поверхности образцов в среде MEM на микроуровне, в условиях *in vitro*. Разработана новая методика съемки локальных значений плотности тока и pH для точного и детального установления влияния ингибитора на процесс подавления коррозии – в области искусственно созданного дефекта, в точке непосредственно над поверхностью образца без покрытия. Установлено влияние типа защитного покрытия и продуктов коррозии, образующихся на поверхности биodeградируемого магниевого сплава, на скорость биорезорбции имплантационного материала. Эффективность действия ингибитора в составе такого покрытия достигала 99 %. Установлен механизм коррозионной деградации и самозалечивания

образцов из магниевых сплавов с покрытиями, импрегнированными исследуемыми ингибиторами коррозии. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения гибридных самозалечивающихся покрытий, содержащих биodeградируемый полимерный материал и безвредный для человека ингибитор коррозии, для контролируемой биорезорбции и повышения биоактивности имплантационного материала на основе магния. Путем направленной модификации защитного ПЭО-слоя можно получить имплантационный материал, характеризующийся не только скоростью деградации, сопоставимой со скоростью восстановления кости, но и свойствами, способствующими ускорению остеогенеза.

4. Авторами разработаны способы создания самозалечивающихся покрытий с использованием различных наноконтейнеров для ингибиторов коррозии. Исследованы возможности модификации поверхности биорезорбируемого магниевого сплава (на примере МА8, а также образцов магния, полученных по аддитивной технологии) путем формирования гибридных покрытий, содержащих органические биосовместимые ингибиторы коррозии и биорезорбируемый полимерный материал с целью снижения скорости деградации сплава за счет функции активной защиты пролонгированного действия. Выбраны безвредные для человека ингибирующие вещества, пригодные для защиты от коррозии перспективных в биомедицине магниевых сплавов. На примере бензотриазола (ВТА) и олеата натрия (NaOl) был подобран и оптимизирован способ наиболее эффективного импрегнирования пор ПЭО-слоя ингибиторами коррозии, а также снижения скорости его выхода из гетерооксидной матрицы путем обработки полученных композиционных покрытий биорезорбируемым полимерным материалом – поликапролактоном. Представлены способы создания гибридных покрытий последовательным импрегнированием базового ПЭО-слоя NaOl/ВТА в различных концентрациях и затем ПКЛ, а также одностадийным нанесением NaOl/ВТА и ПКЛ из раствора на основе дихлорметана.

Проведена оценка электрохимического поведения гибридных покрытий в процессе выдержки в растворе, имитирующем плазму крови человека (раствор Хэнкса). Олеат- и бензотриазолсодержащие поверхностные слои характеризуются стабильностью коррозионного поведения в течение 7 сут выдержки в исследуемой среде. Сделано предположение, что сформированные покрытия могут обеспечить уровень коррозионной защиты, необходимый и достаточный для обеспечения механической целостности хирургического имплантата в течение начального периода формирования костной ткани – фазы костеобразования. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии установлено, что запечатывание пор ПЭО-покрытия полимерным материалом способствует существенному снижению количества ингибитора, диффундирующего в коррозионно-активный раствор. Полученный результат позволит пролонгировать эффект активной антикоррозионной защиты формируемых гибридных слоев. Это подтверждает эффективность предложенного способа модификации поверхности биорезорбируемых магниевых сплавов.

5. Разработан способ направленной модификации предварительно сформированного в силикатно-фторидном электролите ПЭО-слоя, выступающего в роли пористой матрицы для дальнейшей функционализации, с помощью синтезированных на его поверхности слоистых двойных гидроксидов (СДГ). Представлено два метода интеркаляции СДГ ингибитором коррозии бензотриазолом: при синтезе СДГ (ПЭО-СДГ(ВТА)) и после образования СДГ (ПЭО-СДГ-ВТА). Анализ химического состава подтвердил фор-

мирование СДГ-структур и их интеркаляцию ВТА. Образец ПЭО-СДГ(ВТА) продемонстрировал самые высокие защитные свойства среди всех сплавов с покрытием в течение 24 ч выдержки в 3,5 масс.% растворе NaCl. Начальное значение поляризационного сопротивления для ПЭО-СДГ(ВТА) в 90 раз превышало величину для образца с базовым ПЭО-слоем. Установлено снижение скорости коррозии для образцов в следующей последовательности: ПЭО→ПЭО-СДГ→ПЭО-СДГ-ВТА→ПЭО-СДГ(ВТА). Скорость коррозии ПЭО-СДГ(ВТА) была на 30 % ниже, чем у образца с базовым ПЭО-покрытием. Анализ SVET/SIET-данных выявил на микроуровне снижение во времени коррозионной активности образцов, содержащих ингибитор коррозии. Показано уменьшение площади активной щелочной зоны и значений локальной плотности тока в области искусственно созданного двухточечного дефекта.

6. Разработан способ формирования гибридного покрытия с функцией активной защиты от коррозии при использовании в качестве наноконтейнеров для ингибитора галлуазитных нанотрубок (ГНТ). Найден оптимальный способ импрегнирования ГНТ ингибитором коррозии бензотриазолом и их введения в матрицу ПКЛ. Определен элементный и химический состав сформированных защитных слоев и показано распределение наноконтейнеров с ингибитором по толщине гибридных покрытий. Оценена локальная электрохимическая активность образцов с исследуемыми покрытиями *in vitro* в растворе Хэнкса. Установлено, что в процессе 24 ч выдержки образца с гибридным покрытием с предварительно созданным поверхностным дефектом наблюдается подавление процесса коррозии на микроуровне, подтверждающее проявление эффекта самозалечивания.

Описан механизм деградации образцов с гибридными бензотриазолсодержащими слоями и определено участие ингибитора коррозии в процессе самозалечивания. В результате активации коррозионного процесса и контролируемого выхода ингибитора из пор ПЭО-покрытия, СДГ или ГНТ коррозионная активность материала снижается за счет адсорбции ВТА на поверхности магния и его сплавов в области дефекта и образования комплекса $Mg(VTA-H)_2$. Такой пассивирующий слой препятствует проникновению агрессивных хлорид-ионов и обеспечивает формирование кристаллических продуктов коррозии, защищающих материал от деградации.

Сравнительный анализ уровня защитных свойств сформированных покрытий указывает на эффективность использования альтернативных наноконтейнеров для ингибитора коррозии (СДГ, ГНТ в сравнении с порами ПЭО-слоя) в целях повышения антикоррозионных характеристик сплава магния, особенно в случае низкой совместимости матрицы ПЭО-покрытия и выбранного ингибитора. Установлена перспективность применения гибридных покрытий, содержащих различные наноконтейнеры (поры ПЭО-слоя, слоистые двойные гидроксиды, галлуазитные нанотрубки), загруженные биосовместимым ингибитором коррозии и биорезорбируемым полимером – поликапролактоном, для контроля над процессом резорбции изделий биомедицинского назначения из магния и его сплавов. Сформированное на поверхности магниевового сплава и образца магния, полученного по аддитивной технологии, smart-покрытие может расширить область практического применения функционального и конструкционного материала.

7. Предложен и оптимизирован способ повышения защитных свойств алюминиевого сплава АМгЗ путем формирования гибридных ингибиторсодержащих покрытий на основе оксидного ПЭО-слоя с самоорганизованной микротрубчатой структурой. Вы-

бран оптимальный способ пропитки матрицы ПЭО-покрытия органическими ингибиторами коррозии – бензотриазолом и 1,2,4-триазолом (24-часовая выдержка в 0,05 М растворе). Подтверждено наличие ингибитора коррозии в микротрубках ПЭО-покрытия и установлен характер их распределения в составе поверхностного слоя. Контролируемое высвобождение ингибирующих агентов из пор-микроконтейнеров ПЭО-покрытия обеспечивалось путем обработки полученных композиционных покрытий полимерным материалом – поливинилиденфторидом методом распыления. Этот способ позволяет продлить действие активной антикоррозионной защиты материала подложки. Показано, что пропитка микротрубок ПЭО-покрытия бензотриазолом и 1,2,4-триазолом приводит к значительному снижению локальной электрохимической активности, оцениваемой на микроуровне. Обнаружены более низкие значения локальной плотности тока и более высокие значения pH в растворе вблизи исследуемой поверхности по сравнению с зарегистрированными значениями для образца с ПЭО-слоем, не содержащим ингибитора. Предложен механизм ингибирования коррозии алюминия при использовании гибридного ингибитор- и полимерсодержащего покрытия. Результаты данной работы полезны для лучшего понимания коррозионного поведения алюминия и его сплавов, а также для создания эффективного метода антикоррозионной защиты перспективных конструкционных материалов.

Разработка материалов нового поколения, обладающих функцией активной smart-защиты от коррозии, позволит существенно продвинуться в направлении внедрения материалов из магниевых и алюминиевых сплавов в различные сферы промышленности и медицины. В результате проведенных комплексных исследований сделан шаг вперед в разработке новых материалов по одному из приоритетных направлений в Стратегии научно-технического развития Российской Федерации. Технология создания гибридного модифицированного защитного слоя на поверхности сплавов позволит увеличить эффективность использования материала, будет способствовать развитию внутреннего рынка продуктов РФ и тем самым вносить вклад в обеспечение технологического суверенитета нашей страны.

Список литературы

1. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Khrisanfova O.A., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Sidorova M.V., Gnedenkov A.S., Volkova E.F. Properties of coatings formed on magnesium alloy MA 8 by the method of plasma electrolytic oxidation // *Vestnik of the FEB RAS*. 2010. No. 5(153). P. 35–46. (In Russ.). [Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Хрисанфова О.А., Егоркин В.С., Машталяр Д.В., Сидорова М.В., Гнеденков А.С., Волкова Е.Ф. Свойства покрытий, сформированных на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования // *Вестник ДВО РАН*. 2010. № 5 (153). С. 35–46.]
2. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Plekhova N.G., Gnedenkov S.V. Smart composite anti-bacterial coatings with active corrosion protection of magnesium alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 12. P. 3589–3611.
3. Shang W., Wu F., Wang Y., Rabiei Baboukani A., Wen Y., Jiang J. Corrosion resistance of micro-arc oxidation/graphene oxide composite coatings on magnesium alloys // *ACS Omega*. American Chemical Society. 2020. Vol. 5, No. 13. P. 7262–7270.
4. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Gnedenkov S.V. Hydroxyapatite-containing PEO-coating design for biodegradable Mg-0.8Ca alloy: Formation and corrosion behaviour // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 12. P. 4468–4484.
5. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Sinebryukhov S.L., Puz' A.V., Gnedenkov A.S. [Composite protective coatings on the surface of titanium nickelide] // *Corrosion: Materials, Protection*. 2007. No. 2. P. 20–25. (In Russ.). [Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Синебрюхов С.Л., Пузь А.В., Гнеденков А.С. Композиционные защитные покрытия на поверхности никелида титана // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. № 2. С. 20–25.]
6. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Imshinetskiy I.M., Zheludkevich M.L., Gnedenkov S.V. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 182. P. 109254.
7. Li Y., Lu X., Mei D., Zhang T., Wang F. Passivation of corrosion product layer on AM50 Mg by corrosion inhibitor // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 9. P. 2563–2573.
8. Yang J., Jiang P., Qiu Y., Jao C.Y., Blawert C., Lamaka S., Bouali A., Lu X., Zheludkevich M.L., Li Wei. Experimental and quantum chemical studies of carboxylates as corrosion inhibitors for AM50 alloy in pH neutral NaCl solution // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 2. P. 555–568. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.05.021>
9. Feng J., Pan Y., Yang M., Fernandez C., Chen X., Peng Q. A Lactoglobulin-composite self-healing coating for Mg alloys // *ACS Applied Bio Materials*. 2021. Vol. 4, No. 9. P. 6843–6852. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00560>.
10. Sun M., Yerokhin A., Bychkova M.Y., Shtansky D.V., Levashov E.A., Matthews A. Self-healing plasma electrolytic oxidation coatings doped with benzotriazole loaded halloysite nanotubes on AM50 magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 111. P. 753–769.
11. Xu Y., Wang T., Guo Y., Li G., Lian J. Improvements of corrosion resistance and antibacterial properties of hydroxyapatite/cupric oxide doped titania composite coatings on degradable magnesium alloys // *Langmuir*. American Chemical Society. 2020. Vol. 36, No. 46. P. 13937–13948.
12. Wu L., Wu J., Zhang Z., Zhang C., Zhang Y., Tang A., Li L., Zhang G., Zheng Z., et al. Corrosion resistance of fatty acid and fluoroalkylsilane-modified hydrophobic Mg-Al LDH films on anodized magnesium alloy // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 487. P. 569–580.
13. Shang W., Wu F., Wen Y., He C., Zhan X., Li Y. Corrosion resistance and mechanism of graphene oxide composite coatings on magnesium alloy // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58, No. 3. P. 1200–1211.
14. Cui X.J., Ning C.M., Zhang G.A., Shang L.L., Zhong L.P., Zhang Y.J. Properties of polydimethylsiloxane hydrophobic modified duplex microarc oxidation/diamond-like carbon coatings on AZ31B Mg alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, No. 4. P. 1285–1296.

15. Wang X., Jing C., Chen Y., Wang X., Zhao G., Zhang X., Wu L., Liu X., Dong B., et al. Active corrosion protection of super-hydrophobic corrosion inhibitor intercalated Mg–Al layered double hydroxide coating on AZ31 magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 291–300.
16. Egorkin V.S., Medvedev I.M., Sinebryukhov S.L., Vyaliy I.E., Gnedenkov A.S., Nadaraia K.V., Izotov N.V., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Atmospheric and marine corrosion of PEO and composite coatings obtained on Al–Cu–Mg aluminum alloy // *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 12. P. 2739.
17. Gnedenkov A.S., Kononenko Y.I., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Vyaliy I.E., Nomerovskii A.D., Ustinov A.Y., Gnedenkov S.V. The effect of smart PEO-coatings impregnated with corrosion inhibitors on the protective properties of AlMg3 aluminum alloy // *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 6. P. 2215.
18. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Ustinov A.Y., Sukhovverkhov S.V., Gnedenkov S.V. New polycaprolactone-containing self-healing coating design for enhance corrosion resistance of the magnesium and its alloys // *Polymers*. MDPI. 2023. Vol. 15, No. 1. P. 202.
19. Yang X., Wang G., Dong G., Gong F., Zhang M. Rare earth conversion coating on Mg–8.5Li alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 487, No. 1–2. P. 64–68.
20. Das A.K. Effect of rare earth oxide additive in coating deposited by laser cladding: A review // *Materials Today: Proceedings*. Vol. 52. P. 1558–1564.
21. Reisch M.S. Confronting the looming hexavalent chromium ban // *Chemical & Engineering News*. 2017. Vol. 95, No. 9. P. 28–29.
22. Bouali A.C., Serdechnova M., Blawert C., Tedim J., Ferreira M.G.S., Zheludkevich M.L. Layered double hydroxides (LDHs) as functional materials for the corrosion protection of aluminum alloys: A review // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. P. 100857.
23. Arrabal R., Matykina E., Hashimoto T., Skeldon P., Thompson G.E. Characterization of AC PEO coatings on magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, No. 16. P. 2207–2220.
24. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Localized corrosion of the Mg alloys with inhibitor-containing coatings: SVET and SIET studies // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 102. P. 269–278.
25. Minaev A.N., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Gnedenkov A.S., Nadaraia K.V. Functional plasma electrolytic oxidation coatings for offshore structures // *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering (ISOPE 2014 Busan, South Korea)*. 2014. No. 107291. P. 418–422.
26. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Khisanfova O.A., Gnedenkov S.V. Influence of plasma electrolytic oxidation on mechanical characteristics of NiTi alloy // *Surface Engineering*. 2009. Vol. 25, No. 8. P. 565–569.
27. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Imshinetskiy I.M., Vyaliy I.E., Gnedenkov S.V. Effect of microstructure on the corrosion resistance of TIG welded 1579 alloy // *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 16. P. 2615.
28. Gnedenkov A.S., Filonina V.S., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. A superior corrosion protection of Mg alloy via smart nontoxic hybrid inhibitor-containing coatings // *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 6. P. 2538.
29. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Sidorova M.V., Gnedenkov A.S. Composite polymer-containing protective coatings on magnesium alloy MA8 // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 85. P. 52–59.
30. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Features of the magnesium alloys corrosion in the chloride-containing media // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 213. P. 143–148.
31. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Gnedenkov S.V. Anticorrosion hydroxyapatite-containing coatings for the functionalization of bioresorbable magnesium alloys // *Chemical Engineering*. 2023. Vol. 24(10). P. 374–385. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Филонина В.С., Гнеденков С.В. Антикоррозионные гидроксиапатитсодержащие покрытия для функционализации биорезорбируемых магниевых сплавов // *Химическая технология*. 2023. Т. 24, № 10. С. 374–385.]
32. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Protective properties of inhibitor-containing composite coatings on a Mg alloy // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 102. P. 348–354.
33. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Gnedenkov A.S., Bouznik V.M. Composite fluoropolymer coatings on the MA8 magnesium alloy surface // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 111. P. 175–185.
34. Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Imshinetskiy I.M., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. New approach to formation of coatings on Mg–Mn–Ce alloy using a combination of plasma treatment and spraying of fluoropolymers // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 4. P. 1033–1050.

35. Daavari M., Conde A., Atapour M., HosseinpourRokni M., Mora Sánchez H., Mohedano M., Matykina E., Arrabal R. In vitro corrosion-assisted cracking of AZ31B Mg alloy with a hybrid PEO+MWCNTs/PCL coating // *Surfaces and Interfaces*. 2023. Vol. 42. P. 103446.
36. Kaseem M., Dikici B., Dafali A., Fattah-alhosseini A. Self-assembly of coumarin molecules on plasma electrolyzed layer for optimizing the electrochemical performance of AZ31 Mg alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 5. P. 1618–1628.
37. Yang L., Li Y., Qian B., Hou B. Polyaspartic acid as a corrosion inhibitor for WE43 magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2015. Vol. 3, No. 1. P. 47–51.
38. Abdullayev E., Price R., Shchukin D., Lvov Y. Halloysite tubes as nanocontainers for anticorrosion coating with benzotriazole // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2009. Vol. 1, No. 7. P. 1437–1443.
39. Umoren S.A., Abdullahi M.T., Solomon M.M. An overview on the use of corrosion inhibitors for the corrosion control of Mg and its alloys in diverse media // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. P. 2060–2093.
40. Guo X.-P., Song G.-L., Hu J.-Y., Huang D.-B. Corrosion inhibition of magnesium (Mg) alloys // *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*. 2013. P. 61–84. <https://doi.org/10.1533/9780857098962.1.61>
41. Song G., StJohn D.H. Corrosion of magnesium alloys in commercial engine coolants // *Materials and Corrosion*. 2005. Vol. 56, No. 1. P. 15–23. <https://doi.org/10.1002/maco.200403803>
42. Song G.-L., Xu Z. The surface, microstructure and corrosion of magnesium alloy AZ31 sheet // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, No. 13. P. 4148–4161.
43. Lamaka S.V., Vaghefinazari B., Mei D., Petrauskas R.P., Höche D., Zheludkevich M.L. Comprehensive screening of Mg corrosion inhibitors // *Corrosion Science*. 2017. Vol. 128. P. 224–240.
44. Al-Amieri A.A., Isahak W.N.R.W., Al-Azzawi W.K. Corrosion inhibitors: natural and synthetic organic inhibitors // *Lubricants*. 2023. Vol. 11, No. 4. P. 174.
45. Jamshidipour Z., Toorani M., Aliofkhaezai M., Mahdavian M. Reducing damage extent of epoxy coating on magnesium substrate by Zr-enhanced PEO coating as an effective pretreatment // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 1, No. 2. P. 641–656.
46. Jiang X., Guo R., Jiang S. Evaluation of self-healing ability of Ce–V conversion coating on AZ31 magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2016. Vol. 4, No. 3. P. 230–241.
47. Adsul S.H., Bagale U.D., Sonawane S.H., Subasri R. Release rate kinetics of corrosion inhibitor loaded halloysite nanotube-based anticorrosion coatings on magnesium alloy AZ91D // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, No. 1. P. 202–215.
48. Ouyang Y., Li L.-X., Xie Z.-H., Tang L., Wang F., Zhong C.-J. A self-healing coating based on facile pH-responsive nanocontainers for corrosion protection of magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 3. P. 836–849.
49. Williams G., McMurray H.N., Grace R. Inhibition of magnesium localised corrosion in chloride containing electrolyte // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, No. 27. P. 7824–7833.
50. Feng Z., Hurley B., Li J., Buchheit R. Corrosion inhibition study of aqueous vanadate on Mg alloy AZ31 // *Journal of the Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165, No. 2. P. C94–C102.
51. Kharitonov D.S., Zimowska M., Ryl J., Zieliński A., Osipenko M.A., Adamiec J., Wrzesińska A., Claesson P.M., Kurilo I.I. Aqueous molybdate provides effective corrosion inhibition of WE43 magnesium alloy in sodium chloride solutions // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 190. P. 109664.
52. Cui Z., Ge F., Lin Y., Wang L., Lei L., Tian H., Yu M., Wang X. Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in the chloride solution containing ammonium nitrate // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 278. P. 421–437.
53. Williams G., Grace R., Woods R.M. Inhibition of the localized corrosion of Mg alloy AZ31 in chloride containing electrolyte // *Corrosion*. 2015. Vol. 71, No. 2. P. 184–198.
54. Correa P.S., Malfatti C.F., Azambuja D.S. Corrosion behavior study of AZ91 magnesium alloy coated with methyltriethoxysilane doped with cerium ions // *Progress in Organic Coatings*. 2011. Vol. 72, No. 4. P. 739–747.
55. Montemor M.F., Simões A.M., Carmezim M.J. Characterization of rare-earth conversion films formed on the AZ31 magnesium alloy and its relation with corrosion protection // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253, No. 16. P. 6922–6931.

56. Kartsonakis I.A., Stanciu S.G., Matei A.A., Karaxi E.K., Hristu R., Karantonis A., Charitidis C.A. Evaluation of the protective ability of typical corrosion inhibitors for magnesium alloys towards the Mg ZK30 variant // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 100. P. 194–208.
57. Anjum M.J., Zhao J.-M., Asl V.Z., Malik M.U., Yasin G., Khan W.Q. Green corrosion inhibitors intercalated Mg:Al layered double hydroxide coatings to protect Mg alloy // *Rare Metals*. 2021. Vol. 40, No. 8. P. 2254–2265.
58. Wang J.-L., Ke C., Pohl K., Biribilis N., Chen X.-B. The unexpected role of benzotriazole in mitigating magnesium alloy corrosion: A nucleating agent for crystalline nanostructured magnesium hydroxide film // *Journal of the Electrochemical Society*. 2015. Vol. 162, No. 8. P. C403–C411.
59. Song H., Xu Z., Benabou L., Yin Z., Guan H., Yan H., Chao L., Hu Z., Wang X. Sodium dodecyl sulfate (SDS) as an effective corrosion inhibitor for Mg-8Li-3Al alloy in aqueous NaCl: A combined experimental and theoretical investigation // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.07.006>
60. Hossain A.M.S., Méndez-Arriaga J.M., Xia C., Xie J., Gómez-Ruiz S. Metal complexes with ONS donor Schiff bases. A review // *Polyhedron*. 2022. Vol. 217. P. 115692.
61. Ali A., Pervaiz M., Saeed Z., Younas U., Bashir R., Ullah S., Bukhari S.M., Ali F., Jelani S., et al. Synthesis and biological evaluation of 4-dimethylaminobenzaldehyde derivatives of Schiff bases metal complexes: A review // *Inorganic Chemistry Communications*. 2022. Vol. 145. P. 109903.
62. Seifzadeh D., Bezaatpour A., Shamkhali A.N., Basharnavaz H. Experimental and theoretical studies to examine the inhibition effect of a schiff base against magnesium corrosion // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016. Vol. 69, No. 8. P. 1545–1555.
63. Liu R., Liu Y., Yong Q., Xie Z.-H., Wu L., Zhong C.-J. Highly corrosion-resistant ZIF-8-integrated micro-arc oxidation coating on Mg alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2023. Vol. 463. P. 129505.
64. He X., Chiu C., Esmacher M.J., Liang H. Nanostructured photocatalytic coatings for corrosion protection and surface repair // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 237. P. 320–327.
65. Qi G., Wang Y., Estevez L., Switzer A.K., Duan X., Yang X., Giannelis E.P. Facile and scalable synthesis of monodispersed spherical capsules with a mesoporous shell // *Chemistry of Materials*. 2010. Vol. 22, No. 9. P. 2693–2695.
66. Hiromoto S. Self-healing property of hydroxyapatite and octacalcium phosphate coatings on pure magnesium and magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 100. P. 284–294.
67. Yagi S., Kuwabara K., Fukuta Y., Kubota K., Matsubara E. Formation of self-repairing anodized film on ACM522 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 73. P. 188–195.
68. Chen D., Li N., Tang F., Qi S. Facile and scalable synthesis of tailored silica “nanorattle” structures // *Advanced Materials*. 2009. Vol. 21, No. 37. P. 3804–3807.
69. Galio A.F., Lamaka S. V., Zheludkevich M.L., Dick L.F.P., Müller I.L., Ferreira M.G.S. Inhibitor-doped sol-gel coatings for corrosion protection of magnesium alloy AZ31 // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204, No. 9–10. P. 1479–1486.
70. Cicileo G.P., Rosales B.M., Varela F.E., Vilche J.R. Inhibitory action of 8-hydroxyquinoline on the copper corrosion process // *Corrosion Science*. 1998. Vol. 40, No. 11. P. 1915–1926.
71. Lamaka S.V., Zheludkevich M.L., Yasakau K.A., Montemor M.F., Ferreira M.G.S. High effective organic corrosion inhibitors for 2024 aluminium alloy // *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 52, No. 25. P. 7231–7247.
72. Lamaka S.V., Knörschild G., Snihirova D.V., Taryba M.G., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S. Complex anticorrosion coating for ZK30 magnesium alloy // *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 55, No. 1. P. 131–141.
73. Gao H., Li Q., Dai Y., Luo F., Zhang H.X. High efficiency corrosion inhibitor 8-hydroxyquinoline and its synergistic effect with sodium dodecylbenzenesulphonate on AZ91D magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52, No. 5. P. 1603–1609.
74. Huang D., Hu J., Song G.L., Guo X. Inhibition effect of inorganic and organic inhibitors on the corrosion of Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy in an ethylene glycol solution at ambient and elevated temperatures // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56, No. 27. P. 10166–10178.
75. Zhang R.F., Zhang S.F., Yang N., Yao L.J., He F.X., Zhou Y.P., Xu X., Chang L., Bai S.J. Influence of 8-hydroxyquinoline on properties of anodic coatings obtained by micro arc oxidation on AZ91 magnesium alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 539. P. 249–255.

76. Fu J., Chen T., Wang M., Yang N., Li S., Wang Y., Liu X. Acid and alkaline dual stimuli-responsive mechanized hollow mesoporous silica nanoparticles as smart nanocontainers for intelligent anticorrosion coatings // *ACS Nano*. 2013. Vol. 7, No. 12. P. 11397–11408.
77. Snihirova D., Lamaka S.V., Taryba M., Salak A.N., Kallip S., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S., Montemor M.F. Hydroxyapatite microparticles as feedback-active reservoirs of corrosion inhibitors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2, No. 11. P. 3011–3022.
78. Zheludkevich M. Self-healing anticorrosion coatings // *Self-healing materials: Fundamentals, design strategies, and applications*. Weinheim, Germany: John Wiley and Sons, 2009. P. 101–139.
79. Taryba M., Lamaka S.V., Snihirova D., Ferreira M.G.S., Montemor M.F., Wijting W.K., Toews S., Grundmeier G. The combined use of scanning vibrating electrode technique and micro-potentiometry to assess the self-repair processes in defects on “smart” coatings applied to galvanized steel // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56, No. 12. P. 4475–4488.
80. Snihirova D., Lamaka S.V., Taryba M., Salak A.N., Kallip S., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S., Montemor M.F. Hydroxyapatite microparticles as feedback-active reservoirs of corrosion inhibitors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2, No. 11. P. 3011–3022.
81. Wang X., Li L., Xie Z.-H., Yu G. Duplex coating combining layered double hydroxide and 8-quinolinol layers on Mg alloy for corrosion protection // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 283. P. 1845–1857.
82. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Nomerovskii A.D., Filonina V.S., Ustinov A.Y., Gnedenkov S.V. Design of self-healing PEO-based protective layers containing *in-situ* grown LDH loaded with inhibitor on the MA8 magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 10. P. 3688–3709. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.016>
83. Maltseva A., Lamaka S.V., Yasakau K.A., Mei D., Kurchavov D., Zheludkevich M.L., Lefèvre G., Volovitch P. In situ surface film evolution during Mg aqueous corrosion in presence of selected carboxylates // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 171. P. 108484.
84. Kaseem M., Ko Y.G. Formation of flower-like structures for optimizing the corrosion resistance of Mg alloy // *Materials Letters*. 2018. Vol. 221. P. 196–200.
85. Al Zoubi W., Ko Y.G. Self-assembly of hierarchical N-heterocycles-inorganic materials into three-dimensional structure for superior corrosion protection // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 356. P. 850–856.
86. Al Zoubi W., Kim M.J., Yoon D.K., Salih Al-Hamdani A.A., Kim Y.G., Ko Y.G. Effect of organic compounds and rough inorganic layer formed by plasma electrolytic oxidation on photocatalytic performance // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 823. P. 153787.
87. Anjum M.J., Zhao J., Ali H., Tabish M., Murtaza H., Yasin G., Malik M.U., Khan W.Q. A review on self-healing coatings applied to Mg alloys and their electrochemical evaluation techniques // *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15, No. 4. P. 3040–3053.
88. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Sergienko V.I., Gnedenkov S.V. Physicochemical bases of local heterogeneous corrosion of magnesium and aluminium alloys. Moscow: TECHNOSFERA, 2022. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Филонина В.С., Сергиенко В.И., Гнеденков С.В. Физико-химические основы локальной гетерогенной коррозии магниевых и алюминиевых сплавов. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. 424 с.]
89. Babu P., Solomon D.G. Mechanical and tribological properties of magnesium composites – A review // *Materials Today: Proceedings*. Available online 21 July 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.065>
90. Ravindran S., Lovinger Z., Gandhi V., Mello M., Ravichandran G. Strength of magnesium at high pressures and strain rates // *Extreme Mechanics Letters*. 2020. Vol. 41. P. 101044.
91. Luthringer B.J.C., Feyerabend F., Willumeit-Römer R. Magnesium-based implants: a mini-review // *Magnesium Research*. 2014. Vol. 27, No. 4. P. 142–154.
92. Yang Y., Xiong X., Chen J., Peng X., Chen D., Pan F. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022 // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 8. P. 2611–2654.
93. Rider P., Kačarević Ž.P., Elad A., Tadic D., Rothamel D., Sauer G., Bornert F., Windisch P., Hangyási D.B., et al. Biodegradable magnesium barrier membrane used for guided bone regeneration in dental surgery // *Bioactive Materials*. 2022. Vol. 14. P. 152–168.
94. Gazit T., Robinson D., Khawalde K., Eisa M., Qassem K., Heller E., Yassin M. Foot surgery using resorbable magnesium screws // *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. 2023. Vol. 63, No. 1. P. 79–84. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2023.09.002>

95. Tang C.-F., Ding H., Jiao R.-Q., Wu X.-X., Kong L.-D. Possibility of magnesium supplementation for supportive treatment in patients with COVID-19 // *European Journal of Pharmacology*. 2020. Vol. 886. P. 173546.
96. Niranjana C.A., Raghavendra T., Rao M.P., Siddaraju C., Gupta M., Jain V.K.S., Aishwarya R. Magnesium alloys as extremely promising alternatives for temporary orthopedic implants – A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 8. P. 2688–2718.
97. Fairley J.L., Zhang L., Glassford N.J., Bellomo R. Magnesium status and magnesium therapy in cardiac surgery: A systematic review and meta-analysis focusing on arrhythmia prevention // *Journal of Critical Care*. 2017. Vol. 42. P. 69–77.
98. He D., Gong H., Zhang Z., Zheng Y., Zhang H., Li Y. In-vitro corrosion behaviors of extruded Mg–Ga alloys in alpha minimum essential medium // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 208. P. 110621.
99. Wang C., Xu W., Höche D., Zheludkevich M.L., Lamaka S. V. Exploring the contribution of oxygen reduction reaction to Mg corrosion by modeling assisted local analysis // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 100–109.
100. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Egorkin V.S., Ustinov A.Y., Sergienko V.I., Gnedenkov S.V. The detailed corrosion performance of bioresorbable Mg-0.8Ca alloy in physiological solutions // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 5. P. 1326–1350.
101. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Zheludkevich M.L., Gnedenkov S.V. Localized corrosion of magnesium alloys potentially applicable for medical implants: fundamental aspects // *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 12. P. 46–51. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Ламака С.В., Синебрюхов С.Л., Филонина В.С., Желудкевич М.Л., Гнеденков С.В. Фундаментальные аспекты локальной коррозии магниевых сплавов, перспективных для имплантационной хирургии // *Цветные металлы*. 2021. № 12. С. 46–51.]
102. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D. V., Egorkin V.S., Imshinetskiy I.M., Zavidnaya A.G., Zheludkevich M.L., Gnedenkov S.V. Electrochemical behaviour of the MA8 Mg alloy in minimum essential medium // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 168. P. 108552.
103. Bahmani A., Lotfipour M., Taghizadeh M., Kim W.-J. Corrosion behavior of severely plastically deformed Mg and Mg alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 2607–2648.
104. Noviana D., Paramitha D., Ulum M.F., Hermawan H. The effect of hydrogen gas evolution of magnesium implant on the postimplantation mortality of rats // *Journal of Orthopaedic Translation*. 2016. Vol. 5. P. 9–15.
105. Ma D., Zhao J., Zhang L., Huang J., Liu J., Ren T. Isatin Schiff bases: A green and sustainable Mg alloys corrosion inhibitor // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 307. P. 128163.
106. Guo X., An M., Yang P., Li H., Su C. Effects of benzotriazole on anodized film formed on AZ31B magnesium alloy in environmental-friendly electrolyte // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 482, No. 1–2. P. 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.053>
107. Zhang W., Zhang D., Li X., Li C., Gao L. Excellent performance of dodecyl dimethyl betaine and calcium gluconate as hybrid corrosion inhibitors for Al alloy in alkaline solution // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 207. P. 110556.
108. Tourir R., Cenoui M., El Bakri M., Ebn Touhami M. Sodium gluconate as corrosion and scale inhibitor of ordinary steel in simulated cooling water // *Corrosion Science*. 2008. Vol. 50, No. 6. P. 1530–1537.
109. Xiang T., Zhang Y., Cui L., Wang J., Chen D., Zheng S., Qiang Y. Synergistic inhibition of benzotriazole and sodium D-gluconate on steel corrosion in simulated concrete pore solution // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 661. P. 130918.
110. Xu P., Zhou J., Li G., Wang P., Wang P., Li F., Zhang B., Chi H. Corrosion inhibition efficiency of compound nitrite with D-sodium gluconate on carbon steel in simulated concrete pore solution // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. P. 123101.
111. Li J.H., Zhao B., Hu J., Zhang H., Dong S.G., Du R.G., Lin C.J. Corrosion inhibition effect of D-sodium gluconate on reinforcing steel in chloride-contaminated simulated concrete pore solution // *International Journal of Electrochemical Science*. 2015. Vol. 10, No. 1. P. 956–968.
112. Felten M., Nowak J., Beyss O., Grünewald P., Motz C., Zander D. The effect of time dependent native oxide surface conditions on the electrochemical corrosion resistance of Mg and Mg-Al-Ca alloys // *Corrosion Science*. 2023. Vol. 212. P. 110925.

113. Santamaria M., Di Quarto F., Zanna S., Marcus P. Initial surface film on magnesium metal: A characterization by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and photocurrent spectroscopy (PCS) // *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 53, No. 3. P. 1314–1324.
114. Chen L., Xu C., Zhang X.-F., Zhou T. Raman and infrared-active modes in MgO nanotubes // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2009. Vol. 41, No. 5. P. 852–855.
115. Liang W., Yin Y., Wang L., Chen L., Li H. A new method of preparing anhydrous magnesium carbonate (MgCO_3) under high pressure and its thermal property // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 702. P. 346–351.
116. Kalaimani N., Ramya K., Aarthi R., Ramachandra Raja C. Growth, structural, optical, spectral and thermal characterization of third order nonlinear optical crystal: Diammonium fumarate // *Chinese Journal of Physics*. 2019. Vol. 61. P. 104–112.
117. Du Y., Fang H.X., Zhang Q., Zhang H.L., Hong Z. Spectroscopic investigation on cocrystal formation between adenine and fumaric acid based on infrared and Raman techniques // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2016. Vol. 153. P. 580–585.
118. Mohaček-Grošev V., Šošarić V., Maksimović A. Raman spectroscopic evidence of low temperature stability of d,l-glycolic and l-(+)-lactic acid crystals // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2015. Vol. 140. P. 35–43.
119. Kister G., Cassanas G., Vert M. Morphology of poly(glycolic acid) by IR and Raman spectroscopies // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 1997. Vol. 53, No. 9. P. 1399–1403.
120. Vasko P.D., Blackwell J., Koenig J.L. Infrared and raman spectroscopy of carbohydrates. // *Carbohydrate Research*. 1972. Vol. 23, No. 3. P. 407–416.
121. Yan Y., Ou X., Zhang H. ^{17}O NMR and Raman spectra of water with different calcium salts // *Journal of Molecular Structure*. 2014. Vol. 1074. P. 310–314.
122. González Fà A., López-Corral I., Faccio R., Juan A., Di Nezio M.S. Surface enhancement Raman spectroscopy and density functional theory study of silver nanoparticles synthesized with d-glucose // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2018. Vol. 49, No. 11. P. 1756–1764.
123. Keyvani A., Kamkar N., Chaharmahali R., Bahamirian M., Kaseem M., Fattah-alhosseini A. Improving anti-corrosion properties AZ31 Mg alloy corrosion behavior in a simulated body fluid using plasma electrolytic oxidation coating containing hydroxyapatite nanoparticles // *Inorganic Chemistry Communications*. 2023. Vol. 158. P. 111470.
124. Yasakau K.A., Maltseva A., Lamaka S.V., Mei D., Orvi H., Volovitch P., Ferreira M.G.S., Zheludkevich M.L. The effect of carboxylate compounds on Volta potential and corrosion inhibition of Mg containing different levels of iron // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 194. P. 109937.
125. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Vyalii I.E., Egorkin V.S., Gnedenkov S.V. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0.5 M NaCl solution. Part 1: Specificity of development // *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 10. P. 2053.
126. Gnedenkov A.S., Mei D., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Vyalii I.E., Zheludkevich M.L., Gnedenkov S.V. Localized currents and pH distribution studied during corrosion of MA8 Mg alloy in the cell culture medium // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 170. P. 108689.
127. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Zavidnaya A.G., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Nistratova M.V., Yerokhin A., Matthews A. PEO coatings obtained on an Mg–Mn type alloy under unipolar and bipolar modes in silicate-containing electrolytes // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204, No. 14. P. 2316–2322.
128. Kutus B., Gaona X., Pallagi A., Pálkó I., Altmair M., Sipos P. Recent advances in the aqueous chemistry of the calcium(II)-gluconate system – Equilibria, structure and composition of the complexes forming in neutral and in alkaline solutions // *Coordination Chemistry Reviews*. 2020. Vol. 417. P. 213337.
129. Chaharmahali R., Fattah-alhosseini A., Babaei K. Surface characterization and corrosion behavior of calcium phosphate (Ca-P) base composite layer on Mg and its alloys using plasma electrolytic oxidation (PEO): A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, No. 1. P. 21–40.
130. Zhao Q., Guo X., Dang X., Hao J., Lai J., Wang K. Preparation and properties of composite MAO/ECD coatings on magnesium alloy // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013. Vol. 102. P. 321–326.
131. Wang X.J., Xu D.K., Wu R.Z., Chen X.B., Peng Q.M., Jin L., Xin Y.C., Zhang Z.Q., Liu Y., et al. What is going on in magnesium alloys? // *Journal of Materials Science & Technology*. 2018. Vol. 34, No. 2. P. 245–247.

132. Xie D., Pan H., Huang Y., Zhang D., Tang W., Yang C., Xie H., Ren Y., Qin G. Microstructure and mechanical property of a novel heat-resistant Mg-Ca-Mn based alloy // *Materials Characterization*. 2022. Vol. 194. P. 112428.
133. Sezer N., Evis Z., Kayhan S.M., Tahmasebifar A., Koç M. Review of magnesium-based biomaterials and their applications // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2018. Vol. 6, No. 1. P. 23–43.
134. Zong J., He Q., Liu Y., Qiu M., Wu J., Hu B. Advances in the development of biodegradable coronary stents: A translational perspective // *Materials Today Bio*. 2022. Vol. 16. P. 100368.
135. Singh N., Batra U., Kumar K., Ahuja N., Mahapatro A. Progress in bioactive surface coatings on biodegradable Mg alloys: A critical review towards clinical translation // *Bioactive Materials*. 2023. Vol. 19. P. 717–757.
136. Liu R.L., Scully J.R., Williams G., Birbilis N. Reducing the corrosion rate of magnesium via microalloying additions of group 14 and 15 elements // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 260. P. 184–195.
137. Gerashi E., Alizadeh R., Mahmudi R. Improved corrosion resistance and mechanical properties of biodegradable Mg–4Zn–xSr alloys: effects of heat treatment, Sr additions, and multi-directional forging // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. P. 3363–3380.
138. Zhao Y., Wu G., Pan H., Yeung K.W.K., Chu P.K. Formation and electrochemical behavior of Al and O plasma-implanted biodegradable Mg–Y–RE alloy // *Materials Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 132, No. 1. P. 187–191.
139. Heshmati M., Seifzadeh D., Shoghi P., Gholizadeh-Gheshlaghi M. Duplex Ni–Zn–Cu–P/Ni–P electroless coating on magnesium alloy via maleic acid pretreatment // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 328. P. 20–29.
140. Rajabalizadeh Z., Seifzadeh D. Application of electroless Ni–P coating on magnesium alloy via CrO₃/HF free titanate pretreatment // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 422. P. 696–709.
141. Wu G., Ding K., Zeng X., Wang X., Yao S. Improving corrosion resistance of titanium-coated magnesium alloy by modifying surface characteristics of magnesium alloy prior to titanium coating deposition // *Scripta Materialia*. 2009. Vol. 61, No. 3. P. 269–272.
142. Osipenko M.A., Kasach A.A., Adamiec J., Zimowska M., Kurilo I.I., Kharytonau D.S. Corrosion inhibition of magnesium alloy AZ31 in chloride-containing solutions by aqueous permanganate // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2023. Vol. 27, No. 7. P. 1847–1860.
143. Yang H., Guo X., Chen X., Birbilis N. A homogenisation pre-treatment for adherent and corrosion-resistant Ni electroplated coatings on Mg-alloy AZ91D // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 79. P. 41–49.
144. Kim J.J., Hou L., Huang N.F. Vascularization of three-dimensional engineered tissues for regenerative medicine applications // *Acta Biomaterialia*. 2016. Vol. 41. P. 17–26.
145. Wu G., Zeng X., Ding W., Guo X., Yao S. Characterization of ceramic PVD thin films on AZ31 magnesium alloys // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252, No. 20. P. 7422–7429.
146. Hoche H., Groß S., Oechsner M. Development of new PVD coatings for magnesium alloys with improved corrosion properties // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 259. P. 102–108.
147. Wu G., Zeng X., Li G., Yao S., Wang X. Preparation and characterization of ceramic/metal duplex coatings deposited on AZ31 magnesium alloy by multi-magnetron sputtering // *Materials Letters*. 2006. Vol. 60, No. 5. P. 674–678.
148. Chen X.-B., Easton M.A., Birbilis N., Yang H.-Y., Abbott T.B. Corrosion-resistant electrochemical plating of magnesium (Mg) alloys // *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*. 2013. P. 315–346.
149. Li Q. Sol-gel coatings to improve the corrosion resistance of magnesium (Mg) alloys // *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*. 2013. P. 469–485.
150. Nezamdoust S., Seifzadeh D., Rajabalizadeh Z. Application of novel sol-gel composites on magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2019. Vol. 7, No. 3. P. 419–432.
151. Castro Y., Durán A. Control of degradation rate of Mg alloys using silica sol-gel coatings for biodegradable implant materials // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2019. Vol. 90, No. 1. P. 198–208.
152. Xue Z.Y., Li X.J., Chu J.H., Li M.M., Zou D.N., Tong L.B. Greatly enhanced corrosion/wear resistances of epoxy coating for Mg alloy through a synergistic effect between functionalized graphene and insulated blocking layer // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2024. Vol. 12, No. 1. P. 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.04.007>.

153. Nakatani T., Takeuchi H., Wada A., Yamashita S. Investigation of anti-corrosive performance of a Si-doped DLC-coated magnesium alloy stent deposited by RF-plasma CVD // *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2019. Vol. 32, No. 3. P. 511–517.
154. Jeong H., Cho J. Characterization of interfacial layers grown between magnesium substrates and SiO films deposited by plasma-enhanced CVD // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 332. P. 105–111.
155. Brunelli K., Dabalà M., Calliari I., Magrini M. Effect of HCl pre-treatment on corrosion resistance of cerium-based conversion coatings on magnesium and magnesium alloys // *Corrosion Science*. 2005. Vol. 47, No. 4. P. 989–1000.
156. Zhao M., Wu S., Luo J., Fukuda Y., Nakae H. A chromium-free conversion coating of magnesium alloy by a phosphate–permanganate solution // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200, No. 18–19. P. 5407–5412.
157. Thirumalaikumarasamy D., Balasubramanian V., Sree Sabari S. Prediction and optimization of process variables to maximize the Young's modulus of plasma sprayed alumina coatings on AZ31B magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2017. Vol. 5, No. 1. P. 133–145.
158. Han B., Yang Y., Li J., Deng H., Yang C. Effects of the graphene additive on the corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation (PEO) coating on the AZ91 magnesium alloy // *International Journal of Electrochemical Science*. 2018. Vol. 13, No. 9. P. 9166–9182.
159. Zhang Y., Chen F., Zhang Y., Liu Z., Wang X., Du C. Influence of graphene oxide on the antiwear and antifriction performance of MAO coating fabricated on Mg Li alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 364. P. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.103>
160. Hafili F., Chaharmahali R., Babaei K., Fattah-alhosseini A. Duty cycle influence on the corrosion behavior of coatings created by plasma electrolytic oxidation on AZ31B magnesium alloy in simulated body fluid // *Corrosion Communications*. 2021. Vol. 3. P. 62–70.
161. Fattah-alhosseini A., Babaei K., Molaei M. Plasma electrolytic oxidation (PEO) treatment of zinc and its alloys: A review // *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 18. P. 100441.
162. Fattah-alhosseini A., Gashti S.O., Molaie M. Effects of disodium phosphate concentration ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) on microstructure and corrosion resistance of Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coatings on 2024 Al alloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. Vol. 27, No. 2. P. 825–834.
163. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Microscale morphology and properties of the PEO-coating surface // *Physics Procedia*. 2012. Vol. 23, No. 2011. P. 98–101.
164. Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Imshinetskiy I.M., Gnedenkov A.S., Bouznik V.M. Composite coatings formed using plasma electrolytic oxidation and fluoroparaffin materials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 767. P. 353–360.
165. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Inhibitor-containing composite coatings on Mg alloys: Corrosion mechanism and self-healing protection // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 245. P. 89–96.
166. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D. V., Gnedenkov S.V. Self-healing effect of the protective inhibitor-containing coatings on Mg alloys // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1874. P. 030012.
167. Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R., Babaei K. Impressive strides in amelioration of corrosion and wear behaviors of Mg alloys using applied polymer coatings on PEO porous coatings: A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 5. P. 1171–1190.
168. Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R. Enhancing corrosion and wear performance of PEO coatings on Mg alloys using graphene and graphene oxide additions: A review // *FlatChem*. 2021. Vol. 27. P. 100241.
169. Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R., Babaei K., Nouri M., Keshavarz M.K., Kaseem M. A review of effective strides in amelioration of the biocompatibility of PEO coatings on Mg alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 9. P. 2354–2383.
170. Attarzadeh N., Molaei M., Babaei K., Fattah-alhosseini A. New promising ceramic coatings for corrosion and wear protection of steels: A review // *Surfaces and Interfaces*. 2021. Vol. 23. P. 100997.
171. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S.J. Plasma electrolysis for surface engineering // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 122, No. 2–3. P. 73–93.
172. Jiang B.L., Wang Y.M. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys // *Surface Engineering of Light Alloys*. 2010. P. 110–154. <https://doi.org/10.1533/9781845699451.2.110>

173. Vakili-Azghandi M., Fattah-alhosseini A., Keshavarz M.K. Optimizing the electrolyte chemistry parameters of PEO coating on 6061 Al alloy by corrosion rate measurement: Response surface methodology // *Measurement*. 2018. Vol. 124. P. 252–259.
174. Karbasi M., Nikoomezari E., Hosseini R., Bahramian H., Chaharmahali R., Giannakis S., Kaseem M., Fattah-alhosseini A. A review on plasma electrolytic oxidation coatings for organic pollutant degradation: How to prepare them and what to expect of them? // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 110027.
175. Nikoomezari E., Karbasi M., C.M.A. Melo W., Moris H., Babaei K., Giannakis S., Fattah-alhosseini A. Impressive strides in antibacterial performance amelioration of Ti-based implants via plasma electrolytic oxidation (PEO): A review of the recent advancements // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 441. P. 136003.
176. Molaei M., Fattah-alhosseini A., Nouri M., Nourian A. Systematic optimization of corrosion, bioactivity, and biocompatibility behaviors of calcium-phosphate plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on titanium substrates // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48, No. 5. P. 6322–6337.
177. Kostelac L., Pezzato L., Settimi A.G., Franceschi M., Gennari C., Brunelli K., Rampazzo C., Dabalà M. Investigation of hydroxyapatite (HAP) containing coating on grade 2 titanium alloy prepared by plasma electrolytic oxidation (PEO) at low voltage // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Vol. 30. P. 101888.
178. Moreno L., Mohedano M., Arrabal R., Matykina E. Development and screening of (Ca-P-Si-F)-PEO coatings for biodegradability control of Mg-Zn-Ca alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 8. P. 2220–2237. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.12.011>
179. Grebnev V., Leśniak-Ziółkowska K., Wala M., Dulski M., Altundal Ş., Dutovs A., Avotiņa L., Erts D., Viter R., et al. Modification of physicochemical properties and bioactivity of oxide coatings formed on Ti substrates via plasma electrolytic oxidation in crystalline and amorphous calcium phosphate particle suspensions // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 598. P. 153793.
180. Santos-Coquillat A., Esteban-Lucia M., Martinez-Campos E., Mohedano M., Arrabal R., Blawert C., Zheludkevich M.L., Matykina E. PEO coatings design for Mg-Ca alloy for cardiovascular stent and bone regeneration applications // *Materials Science and Engineering: C*. 2019. Vol. 105. P. 110026.
181. Jiang D., Xia X., Hou J., Zhang X., Dong Z. Enhanced corrosion barrier of microarc-oxidized Mg alloy by self-healing superhydrophobic silica coating // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58, No. 1. P. 165–178.
182. Chen Y., Lu X., Lamaka S. V., Ju P., Blawert C., Zhang T., Wang F., Zheludkevich M.L. Active protection of Mg alloy by composite PEO coating loaded with corrosion inhibitors // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 504. P. 144462.
183. Vaghefinazari B., Wierzbicka E., Visser P., Posner R., Arrabal R., Matykina E., Mohedano M., Blawert C., Zheludkevich M., et al. Chromate-free corrosion protection strategies for magnesium alloys – A review. Part I – Pre-treatment and conversion coating // *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 23. P. 8676.
184. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Ustinov A.Y., Gnedenkov S.V. Hybrid coatings for active protection against corrosion of Mg and its alloys // *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 14. P. 3035.
185. Al Zoubi W., Yoon D.K., Ko Y.G. Fabrication of heterocycles-inorganic materials for enhancing corrosion resistance // *Journal of Molecular Liquids*. 2020. Vol. 308. P. 113160.
186. Mingo B., Guo Y., Leiva-Garcia R., Connolly B.J., Matthews A., Yerokhin A. Smart functionalization of ceramic-coated AZ31 magnesium alloy // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12, No. 27. P. 30833–30846.
187. Yang S., Sun R., Chen K. Self-healing performance and corrosion resistance of phytic acid/cerium composite coating on microarc-oxidized magnesium alloy // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 428. P. 131198.
188. Zhang G., Wu L., Tang A., Ma Y., Song G.-L., Zheng D., Jiang B., Atrens A., Pan F. Active corrosion protection by a smart coating based on a MgAl-layered double hydroxide on a cerium-modified plasma electrolytic oxidation coating on Mg alloy AZ31 // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 139. P. 370–382.
189. Gnedenkov S.V., Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Kuznetsov Yu.I., Sergienko V.I. [Method of obtaining protective coatings on magnesium alloys]: Patent RU 2543580. No. 2013156183/02; appl. 17.12.2013; publ. 10.03.2015, Bull. 7. (In Russ.). [Гнеденков С.В., Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л.,

- Маштальяр Д.В., Кузнецов Ю.И., Сергиенко В.И. Способ получения защитных покрытий на сплавах магния: патент 2543580 РФ. № 2013156183/02; заявл. 17.12.2013; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7.]
190. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Features of the corrosion processes development at the magnesium alloys surface // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 225. P. 112–118.
 191. Luo H., Cai Q., He J., Wei B. Preparation and properties of composite ceramic coating containing $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ on AZ91D magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation // *Current Applied Physics*. 2009. Vol. 9, No. 6. P. 1341–1346.
 192. Song Y.W., Shan D.Y., Han E.H. High corrosion resistance of electroless composite plating coatings on AZ91D magnesium alloys // *Electrochimica Acta*. 2008. Vol. 53, No. 5. P. 2135–2143.
 193. Chen F., Zhou H., Yao B., Qin Z., Zhang Q. Corrosion resistance property of the ceramic coating obtained through microarc oxidation on the AZ31 magnesium alloy surfaces // *Surface and Coatings Technology*. 2007. Vol. 201, No. 9–11, Spec. Iss. P. 4905–4908.
 194. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Protection properties of inhibitor-containing composite coatings on magnesium alloy // *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 4. P. 33–38. (In Russ.). [Синебрюхов С.Л., Гнеденков А.С., Маштальяр Д.В., Гнеденков С.В. Защитные свойства ингибиторсодержащих композиционных покрытий на сплаве магния // *Цветные металлы*. 2015. No. 4. С. 33–38.]
 195. Sergienko V.I., Gnedenkov A.S., Mashtalyar D.V. Inhibitor-containing composite coatings on the magnesium alloys for the offshore structures equipment // *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2016. Vol. 2016-Janua. P. 400–405.
 196. Krishnakumar V., Ramasamy R. DFT studies and vibrational spectra of isoquinoline and 8-hydroxyquinoline // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2005. Vol. 61, No. 4. P. 673–683.
 197. Kavitha R.J., Ravichandran K., Sankara Narayanan T.S.N. Deposition of strontium phosphate coatings on magnesium by hydrothermal treatment: Characteristics, corrosion resistance and bioactivity // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 745. P. 725–743.
 198. Ur Rehman Z., Uzair M., Lim H.T., Koo B.H. Structural and electrochemical properties of the catalytic CeO_2 nanoparticles-based PEO ceramic coatings on AZ91 Mg alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 726. P. 284–294.
 199. Chrissanthopoulos A., Bouropoulos N., Yannopoulos S.N. Vibrational spectroscopic and computational studies of sol-gel derived CaO-MgO-SiO_2 binary and ternary bioactive glasses // *Vibrational Spectroscopy*. 2008. Vol. 48, No. 1. P. 118–125.
 200. Shi Z., Atrens A. An innovative specimen configuration for the study of Mg corrosion // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53, No. 1. P. 226–246.
 201. Cao F., Shi Z., Hofstetter J., Uggowitzer P.J., Song G., Liu M., Atrens A. Corrosion of ultra-high-purity Mg in 3.5% NaCl solution saturated with $\text{Mg}(\text{OH})_2$ // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 75. P. 78–99.
 202. Wen L., Wang Y., Zhou Y., Guo L., Ouyang J.-H. Microstructure and corrosion resistance of modified 2024 Al alloy using surface mechanical attrition treatment combined with microarc oxidation process // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53, No. 1. P. 473–480.
 203. Guo X., Du K., Guo Q., Wang Y., Wang R., Wang F. Effect of phytic acid on the corrosion inhibition of composite film coated on Mg–Gd–Y alloy // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 76. P. 129–141.
 204. Guo X., Du K., Guo Q., Wang Y., Wang F. Experimental study of corrosion protection of a three-layer film on AZ31B Mg alloy // *Corrosion Science*. 2012. Vol. 65. P. 367–375.
 205. Liu C., Bi Q., Leyland A., Matthews A. An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part I. Establishment of equivalent circuits for EIS data modelling // *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45, No. 6. P. 1243–1256.
 206. Liu C., Bi Q., Leyland A., Matthews A. An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part 2: EIS interpretation of corrosion behaviour // *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45, No. 6. P. 1257–1273.
 207. Ko Y.G., Lee E.S., Shin D.H. Influence of voltage waveform on anodic film of AZ91 Mg alloy via plasma electrolytic oxidation: Microstructural characteristics and electrochemical responses // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 586. P. S357–S361.

208. Wu C.S., Zhang Z., Cao F.H., Zhang L.J., Zhang J.Q., Cao C.N. Study on the anodizing of AZ31 magnesium alloys in alkaline borate solutions // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253, No. 8. P. 3893–3898.
209. Liu F., Shan D., Song Y., Han E.-H., Ke W. Corrosion behavior of the composite ceramic coating containing zirconium oxides on AM30 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53, No. 11. P. 3845–3852.
210. Barchiche C.-E., Rocca E., Hazan J. Corrosion behaviour of Sn-containing oxide layer on AZ91D alloy formed by plasma electrolytic oxidation // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202, No. 17. P. 4145–4152.
211. Zhang S., Li Q., Chen B., Yang X. Preparation and corrosion resistance studies of nanometric sol-gel-based CeO₂ film with a chromium-free pretreatment on AZ91D magnesium alloy // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, No. 3. P. 870–877.
212. Yagi S., Sengoku A., Kubota K., Matsubara E. Surface modification of ACM522 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation in phosphate electrolyte // *Corrosion Science*. 2012. Vol. 57. P. 74–80.
213. Duan H., Yan C., Wang F. Effect of electrolyte additives on performance of plasma electrolytic oxidation films formed on magnesium alloy AZ91D // *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 52, No. 11. P. 3785–3793.
214. Liu G.Y., Tang S., Li D., Hu J. Self-adjustment of calcium phosphate coating on micro-arc oxidized magnesium and its influence on the corrosion behaviour in simulated body fluids // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 79. P. 206–214.
215. Chang L., Tian L., Liu W., Duan X. Formation of dicalcium phosphate dihydrate on magnesium alloy by micro-arc oxidation coupled with hydrothermal treatment // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 72. P. 118–124.
216. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance spectroscopy : theory, experiment, and applications. 2018. 528 p.
217. Jangde A., Kumar S., Blawert C. Influence of glycerol on plasma electrolytic oxidation coatings evolution and on corrosion behaviour of coated AM50 magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2019. Vol. 157. P. 220–246.
218. Arrabal R., Pardo A., Merino M.C., Mohedano M., Casajús P., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E. Corrosion behaviour of a magnesium matrix composite with a silicate plasma electrolytic oxidation coating // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52, No. 11. P. 3738–3749.
219. Shen S., Zuo Y., Zhao X. The effects of 8-hydroxyquinoline on corrosion performance of a Mg-rich coating on AZ91D magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 76. P. 275–283.
220. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. PEO-coating/substrate interface investigation by localised electrochemical impedance spectroscopy // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 205, No. 6. P. 1697–1701.
221. Williams G., McMurray H.N., Grace R. Inhibition of magnesium localised corrosion in chloride containing electrolyte // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, No. 27. P. 7824–7833.
222. Lamaka S., Souto R.M., Ferreira M.G.S. In-situ visualization of local corrosion by Scanning Ion-selective Electrode Technique (SIET) // *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*. 2010. Vol. 3. P. 2162–2173.
223. Yasakau K.A., Kallip S., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S. Active corrosion protection of AA2024 by sol-gel coatings with cerium molybdate nanowires // *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 112. P. 236–246.
224. Lamaka S.V., Karavai O.V., Bastos A.C., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S. Monitoring local spatial distribution of Mg²⁺, pH and ionic currents // *Electrochemistry Communications*. 2008. Vol. 10, No. 2. P. 259–262.
225. Gnedenkov S.V., Mashtalyar D.V., Sinebryukhov S.L., Imshinetsky I.M., Gnedenkov A.S. Composite coatings formed on PEO-layers using fluoroparaffin materials // *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2019. Vol. 4. P. 3863–3867.
226. Andreeva D.V., Skorob E.V., Shchukin D.G. Layer-by-layer polyelectrolyte/inhibitor nanostructures for metal corrosion protection // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2, No. 7. P. 1954–1962.
227. Lamaka S.V., Zheludkevich M.L., Yasakau K.A., Serra R., Poznyak S.K., Ferreira M.G.S. Nanoporous titania interlayer as reservoir of corrosion inhibitors for coatings with self-healing ability // *Progress in Organic Coatings*. 2007. Vol. 58, No. 2–3. P. 127–135.
228. Borisova D., Möhwald H., Shchukin D.G. Mesoporous silica nanoparticles for active corrosion protection // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5, No. 3. P. 1939–1946.
229. Falcón J.M., Batista F.F., Aoki I. V. Encapsulation of dodecylamine corrosion inhibitor on silica nanoparticles // *Electrochimica Acta*. 2014. Vol. 124. P. 109–118.

230. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Localized corrosion of the Mg alloys protected by polymer- and inhibitor-containing composite coating: Mechanism and kinetics // *European Corrosion Congress, EUROCORR* 2015. Vol. 2. P. 985–994.
231. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Isolated corrosion of MA8 alloy with inhibitor-containing composite coating on the surface: kinetics, mechanism and protection // *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 7. P. 49–54. (In Russ.). [Синебрюхов С.Л., Гнеденков А.С., Машталар Д.В., Гнеденков С.В. Локальная коррозия сплава МА8 с ингибиторсодержащим композиционным покрытием на поверхности: кинетика, механизм и защита // *Цветные металлы*. 2015. № 7. С. 49–54.]
232. Song G.L. Corrosion of magnesium alloys // *Corrosion of Magnesium Alloys*. 1st ed. Woodhead Publ., 2011. 640 p.
233. Cao F., Song G.-L., Atrons A. Corrosion and passivation of magnesium alloys // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 111. P. 835–845.
234. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Vyaliy I.E., Gnedenkov S.V. New generation composite coatings with the function of «active» corrosion protection of magnesium alloys // *Vestnik of the FEB RAS*. 2019. No. 6 (208). P. 58–69. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Машталар Д.В., Егоркин В.С., Вялый И.Е., Гнеденков С.В. Композиционные покрытия нового поколения с функцией «активной» коррозионной защиты магниевых сплавов // *Вестник ДВО РАН*. 2019. № 6. С. 58–69.]
235. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Vyaliy I.E., Nadaraia K.V., Imshinetskiy I.M., Nikitin A.I., Subbotin E.P., et al. Magnesium fabricated using additive technology: Specificity of corrosion and protection // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 808. P. 151629.
236. Li S., Liu Y., Tian Z., Liu X., Han Z., Ren L. Biomimetic superhydrophobic and antibacterial stainless-steel mesh via double-potentiostatic electrodeposition and modification // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 403. P. 126355.
237. Abazari S., Shamsipur A., Bakhsheshi-Rad H.R. Reduced graphene oxide (RGO) reinforced Mg biocomposites for use as orthopedic applications: Mechanical properties, cytocompatibility and antibacterial activity // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 12. P. 3612–3627.
238. Zeng J., Ren L., Yuan Y., Wang Y., Zhao J., Zeng R., Yang K., Mei X. Short-term effect of magnesium implantation on the osteomyelitis modeled animals induced by *Staphylococcus aureus* // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2013. Vol. 24, No. 10. P. 2405–2416.
239. Fattah-alhosseini A., Molaei M., Nouri M., Babaei K. Antibacterial activity of bioceramic coatings on Mg and its alloys created by plasma electrolytic oxidation (PEO): A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 1. P. 81–96.
240. Tsakiris V., Tardei C., Clicinski F.M. Biodegradable Mg alloys for orthopedic implants – A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 1884–1905.
241. Campoccia D., Montanaro L., Visai L., Corazzari T., Poggio C., Pegreff F., Maso A., Pirini V., Ravaioli S., et al. Characterization of 26 *Staphylococcus warneri* isolates from orthopedic infections // *The International Journal of Artificial Organs*. 2010. Vol. 33, No. 9. P. 575–581.
242. Montanaro L., Testoni F., Poggi A., Visai L., Speziale P., Arciola C.R. Emerging pathogenetic mechanisms of the implant-related osteomyelitis by *staphylococcus aureus* // *The International Journal of Artificial Organs*. 2011. Vol. 34, No. 9. P. 781–788.
243. Anand R., Gill K.D., Mahdi A.A. Therapeutics of Alzheimer's disease: Past, present and future // *Neuropharmacology*. 2014. Vol. 76. P. 27–50.
244. Zheng H., Weiner L.M., Bar-Am O., Epsztejn S., Cabantchik Z.I., Warshawsky A., Youdim M.B.H., Fridkin M. Design, synthesis, and evaluation of novel bifunctional iron-chelators as potential agents for neuroprotection in Alzheimer's, Parkinson's, and other neurodegenerative diseases // *Bioorganic & Medicinal Chemistry*. 2005. Vol. 13, No. 3. P. 773–783.
245. Youdim M.B.H., Stephenson G., Shachar D.B. Ironing iron out in Parkinson's disease and other neurodegenerative diseases with iron chelators: A lesson from 6-hydroxydopamine and iron chelators, desferal and VK-28 // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2004. Vol. 1012, No. 1. P. 306–325.
246. Martirosyan A., Leonard S., Shi X., Griffith B., Gannett P., Strobl J. Actions of a histone deacetylase inhibitor NSC3852 (5-nitroso-8-quinolinol) link reactive oxygen species to cell differentiation and apoptosis in MCF-7 human mammary tumor cells // *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*. 2006. Vol. 317, No. 2. P. 546–552.

247. Chan S.H., Chui C.H., Chan S.W., Kok S.H.L., Chan D., Tsoi M.Y.T., Leung P.H.M., Lam A.K.Y., Chan A.S.C., et al. Synthesis of 8-hydroxyquinoline derivatives as novel antitumor agents // *ACS Medicinal Chemistry Letters*. 2013. Vol. 4, No. 2. P. 170–174.
248. Shaw A.Y., Chang C.-Y., Hsu M.-Y., Lu P.-J., Yang C.-N., Chen H.-L., Lo C.-W., Shiau C.-W., Chern M.-K. Synthesis and structure-activity relationship study of 8-hydroxyquinoline-derived Mannich bases as anticancer agents // *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2010. Vol. 45, No. 7. P. 2860–2867.
249. Loenarz C., Schofield C.J. Expanding chemical biology of 2-oxoglutarate oxygenases // *Nature Chemical Biology*. 2008. Vol. 4, No. 3. P. 152–156.
250. Moon H., Han S., Park H., Choe J. Crystal structures of human FIH-1 in complex with quinol family inhibitors // *Molecules and Cells*. 2010. Vol. 29, No. 5. P. 471–474.
251. Hopkinson R.J., Tumber A., Yapp C., Chowdhury R., Aik W., Che K.H., Li X.S., Kristensen J.B.L., King O.N.F., et al. 5-Carboxy-8-hydroxyquinoline is a broad spectrum 2-oxoglutarate oxygenase inhibitor which causes iron translocation // *Chemical Science*. 2013. Vol. 4, No. 8. P. 3110.
252. Jacobsen J.A., Fullagar J.L., Miller M.T., Cohen S.M. Identifying chelators for metalloprotein inhibitors using a fragment-based approach // *Journal of Medicinal Chemistry*. 2011. Vol. 54, No. 2. P. 591–602.
253. Hanaya K., Suetsugu M., Saijo S., Yamato I., Aoki S. Potent inhibition of dinuclear zinc(II) peptidase, an aminopeptidase from *Aeromonas proteolytica*, by 8-quinolinol derivatives: inhibitor design based on Zn^{2+} fluorophores, kinetic, and X-ray crystallographic study // *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*. 2012. Vol. 17, No. 4. P. 517–529.
254. Mekouar K., Mouscadet J.-F., Desmaële D., Subra F., Leh H., Savouré D., Auclair C., D'Angelo J. Styrylquinoline derivatives: A new class of potent HIV-1 integrase inhibitors that block HIV-1 replication in CEM cells // *Journal of Medicinal Chemistry*. 1998. Vol. 41, No. 15. P. 2846–2857.
255. Serrao E., Debnath B., Otake H., Kuang Y., Christ F., Debyser Z., Neamati N. Fragment-based discovery of 8-hydroxyquinoline inhibitors of the HIV-1 integrase-lens epithelium-derived growth factor/p75 (IN-LEDGF/p75) interaction // *Journal of Medicinal Chemistry*. 2013. Vol. 56, No. 6. P. 2311–2322.
256. Musiol R., Jampilek J., Buchta V., Silva L., Niedbala H., Podeszwa B., Palka A., Majerz-Maniecka K., Oleksyn B., et al. Antifungal properties of new series of quinoline derivatives // *Bioorganic & Medicinal Chemistry*. 2006. Vol. 14, No. 10. P. 3592–3598.
257. Eweas A.F., Allam G., Abuelsaad A.S.A., Alghamdi A.H., Maghrabi I.A. Design, synthesis, anti-schistosomal activity and molecular docking of novel 8-hydroxyquinoline-5-sufonyl 1,4-diazepine derivatives // *Bioorganic Chemistry*. 2013. Vol. 46, No. 1. P. 17–25.
258. Pandey A.K., Sharma R., Shivahare R., Arora A., Rastogi N., Gupta S., Chauhan P.M.S. Synthesis of perspicamide A and related diverse analogues: Their bioevaluation as potent antileishmanial agents // *Journal of Organic Chemistry*. 2013. Vol. 78, No. 4. P. 1534–1546.
259. Capodagli G.C., Sedhom W.G., Jackson M., Ahrendt K.A., Pegan S.D. A oncompetitive inhibitor for mycobacterium tuberculosis's class iia fructose 1,6-bisphosphate Aldolase // *Biochemistry*. 2014. Vol. 53, No. 1. P. 202–213.
260. Caglić D., Krutein M.C., Bompiani K.M., Barlow D.J., Benoni G., Pelletier J.C., Reitz A.B., Lairson L.L., Houseknecht K.L., et al. Identification of clinically viable quinolinol inhibitors of botulinum neurotoxin A light chain // *Journal of Medicinal Chemistry*. 2014. Vol. 57, No. 3. P. 669–676.
261. Song Y., Xu H., Chen W., Zhan P., Liu X. 8-Hydroxyquinoline: a privileged structure with a broad-ranging pharmacological potential // *MedChemComm*. 2015. Vol. 6, No. 1. P. 61–74.
262. Duarte C., Barreiro E., Fraga C. Privileged structures: A useful concept for the rational design of new lead drug candidates // *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*. 2007. Vol. 7, No. 11. P. 1108–1119.
263. Zhan P., Li D., Li J., Chen X., Liu X. Benzimidazole heterocycle as a privileged scaffold in antiviral agents // *Mini-Reviews in Organic Chemistry*. 2012. Vol. 9, No. 4. P. 397–410.
264. Passos T.F., Souza M.T., Zanutto E.D., de Souza C.W.O. Bactericidal activity and biofilm inhibition of F18 bioactive glass against *Staphylococcus aureus* // *Materials Science and Engineering: C*. 2021. Vol. 118. P. 111475.
265. Patil D., Overland M., Stoller M., Chatterjee K. Bioinspired nanostructured bactericidal surfaces // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2021. Vol. 34. P. 100741.

266. Luque-Agudo V., Fernández-Calderón M.C., Pacha-Olivenza M.A., Pérez-Giraldo C., Gallardo-Moreno A.M., González-Martín M.L. The role of magnesium in biomaterials related infections // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2020. Vol. 191. P. 110996.
267. Chetan S., Vijayalakshmi U. A systematic review of the interaction and effects generated by antimicrobial metallic substituents in bone tissue engineering // *Metallomics*. 2020. Vol. 12, No. 10. P. 1458–1479.
268. Pompa L., Rahman Z.U., Munoz E., Haider W. Surface characterization and cytotoxicity response of biodegradable magnesium alloys // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. Vol. 49. P. 761–768.
269. Virtanen S. Biodegradable Mg and Mg alloys: Corrosion and biocompatibility // *Materials Science and Engineering: B*. 2011. Vol. 176, No. 20. P. 1600–1608.
270. Wagener V., Virtanen S. Protective layer formation on magnesium in cell culture medium // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 63. P. 341–351.
271. Xin Y., Jiang J., Huo K., Tang G., Tian X., Chu P.K. Corrosion resistance and cytocompatibility of biodegradable surgical magnesium alloy coated with hydrogenated amorphous silicon // *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*. 2009. Vol. 89A, No. 3. P. 717–726.
272. Mei D., Wang C., Nienaber M., Pacheco M., Barros A., Neves S., Reis R.L., Zhu S., Bohlen J., et al. Corrosion behavior of Mg wires for ureteral stent in artificial urine solution // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 189. P. 109567.
273. Ding W. Opportunities and challenges for the biodegradable magnesium alloys as next-generation biomaterials // *Regenerative Biomaterials*. 2016. Vol. 3, No. 2. P. 79–86.
274. Zhang L.-C., Xu M., Hu Y.-D., Gao F., Gong T., Liu T., Li X., Pan C.-J. Biofunctionalization of biodegradable magnesium alloy to improve the in vitro corrosion resistance and biocompatibility // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 451. P. 20–31.
275. Chalisgaonkar R. Insight in applications, manufacturing and corrosion behaviour of magnesium and its alloys – A review // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26. P. 1060–1071.
276. Chen Y., Xu Z., Smith C., Sankar J. Recent advances on the development of magnesium alloys for biodegradable implants // *Acta Biomaterialia*. 2014. Vol. 10, No. 11. P. 4561–4573.
277. Dorozhkin S.V. Calcium orthophosphate coatings on magnesium and its biodegradable alloys // *Acta Biomaterialia*. 2014. Vol. 10, No. 7. P. 2919–2934.
278. Witte F. The history of biodegradable magnesium implants: A review // *Acta Biomaterialia*. 2010. Vol. 6, No. 5. P. 1680–1692.
279. Barak M.M., Lieberman D.E., Hublin J.-J. A Wolff in sheep's clothing: Trabecular bone adaptation in response to changes in joint loading orientation // *Bone*. 2011. Vol. 49, No. 6. P. 1141–1151.
280. Chatterjee S., Saxena M., Padmanabhan D., Jayachandra M., Pandya H.J. Futuristic medical implants using bioresorbable materials and devices // *Biosensors and Bioelectronics*. 2019. Vol. 142. P. 111489.
281. Bahmani A., Arthanari S., Shin K.S. Corrosion behavior of Mg–Mn–Ca alloy: Influences of Al, Sn and Zn // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2019. Vol. 7, No. 1. P. 38–46.
282. Bertolini R., Bruschi S., Ghiotti A. Large strain extrusion machining under cryogenic cooling to enhance corrosion resistance of magnesium alloys for biomedical applications // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 26. P. 217–227.
283. Bertolini R., Bruschi S., Ghiotti A., Pezzato L., Dabalà M. Large strain extrusion machining of magnesium alloys for biomedical applications // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 71. P. 105–110.
284. Ratna Sunil B., Sampath Kumar T.S., Chakkingal U., Nandakumar V., Doble M., Devi Prasad V., Raghunath M. In vitro and in vivo studies of biodegradable fine grained AZ31 magnesium alloy produced by equal channel angular pressing // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 59. P. 356–367.
285. Denkena B., Lucas A. Biocompatible magnesium alloys as absorbable implant materials – Adjusted surface and subsurface properties by machining processes // *CIRP Annals*. 2007. Vol. 56, No. 1. P. 113–116.
286. Zhang C.Z., Zhu S.J., Wang L.G., Guo R.M., Yue G.C., Guan S.K. Microstructures and degradation mechanism in simulated body fluid of biomedical Mg–Zn–Ca alloy processed by high pressure torsion // *Materials & Design*. 2016. Vol. 96. P. 54–62.
287. Salahshoor M., Guo Y.B. Surface integrity of magnesium-calcium implants processed by synergistic dry cutting-finish burnishing // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 19. P. 288–293.

288. Li N., Zheng Y. Novel magnesium alloys developed for biomedical application: A review // *Journal of Materials Science & Technology*. 2013. Vol. 29, No. 6. P. 489–502.
289. Hong K., Park H., Kim Y., Knappek M., Minárik P., Máthis K., Yamamoto A., Choe H. Mechanical and biocorrosive properties of magnesium-aluminum alloy scaffold for biomedical applications // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2019. Vol. 98. P. 213–224.
290. Wan Y., Xiong G., Luo H., He F., Huang Y., Zhou X. Preparation and characterization of a new biomedical magnesium-calcium alloy // *Materials and Design*. 2008. Vol. 29, No. 10. P. 2034–2037.
291. Zhang S., Zhang X., Zhao C., Li J., Song Y., Xie C., Tao H., Zhang Y., He Y., et al. Research on an Mg–Zn alloy as a degradable biomaterial // *Acta Biomaterialia*. 2010. Vol. 6, No. 2. P. 626–640.
292. Liu C., Ren Z., Xu Y., Pang S., Zhao X., Zhao Y. Biodegradable magnesium alloys developed as bone repair materials: A review // *Scanning*. 2018. Vol. 2018. P. 1–15.
293. Matias T.B., Asato G.H., Ramasco B.T., Botta W.J., Kiminami C.S., Bolfarini C. Processing and characterization of amorphous magnesium based alloy for application in biomedical implants // *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. Vol. 3, No. 3. P. 203–209.
294. Monfared A., Ghaee A., Ebrahimi-Barough S. Preparation and characterization of crystallized and relaxed amorphous Mg–Zn–Ca alloy ribbons for nerve regeneration application // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 489. P. 71–76.
295. Guan R., Cipriano A.F., Zhao Z., Lock J., Tie D., Zhao T., Cui T., Liu H. Development and evaluation of a magnesium–zinc–strontium alloy for biomedical applications – Alloy processing, microstructure, mechanical properties, and biodegradation // *Materials Science and Engineering: C*. 2013. Vol. 33, No. 7. P. 3661–3669.
296. Feyerabend F., Fischer J., Holtz J., Witte F., Willumeit R., Drücker H., Vogt C., Hort N. Evaluation of short-term effects of rare earth and other elements used in magnesium alloys on primary cells and cell lines // *Acta Biomaterialia*. 2010. Vol. 6, No. 5. P. 1834–1842.
297. Catauro M., Papale F., Sapio L., Naviglio S. Biological influence of Ca/P ratio on calcium phosphate coatings by sol-gel processing // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 65. P. 188–193.
298. Rahman M., Li Y., Wen C. Realization and characterization of double-layer Ca-P coating on WE43 Mg alloy for biomedical applications // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 398. P. 126091.
299. Cui L.-Y., Cheng S.-C., Liang L.-X., Zhang J.-C., Li S.-Q., Wang Z.-L., Zeng R.-C. In vitro corrosion resistance of layer-by-layer assembled polyacrylic acid multilayers induced Ca–P coating on magnesium alloy AZ31 // *Bioactive Materials*. 2020. Vol. 5, No. 1. P. 153–163.
300. Abdelkebir K., Morin-Grognet S., Gaudière F., Coquerel G., Labat B., Atmani H., Ladam G. Biomimetic layer-by-layer templates for calcium phosphate biomineralization // *Acta Biomaterialia*. 2012. Vol. 8, No. 9. P. 3419–3428.
301. Pan H., Yang H., Tang X., Niu J., Xiang Z., Song Y., Lu W. Effect of Ca/P ratio on the structural and corrosion properties of biomimetic CaP coatings on ZK60 magnesium alloy // *Materials Science and Engineering C*. 2017. Vol. 72. P. 676–681. DOI: 10.1016/j.msec.2016.11.132
302. Chunyan Z., Shiyu Z., Xinpeng L., Hongchuan H. Microstructure and corrosion properties of calcium phosphate coating on magnesium alloy prepared by hydrothermal treatment at various pH values // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2018. Vol. 47, No. 10. P. 2993–2999.
303. Su Y., Li K., Wang J. Microstructures, mechanical properties and corrosion resistance of sprayed Ca-P coating for micropatterning carbon/carbon substrate surface // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, No. 6. P. 7374–7387.
304. Zhang S., Liu Q., Li L., Bai Y., Yang B. The controllable lanthanum ion release from Ca-P coating fabricated by laser cladding and its effect on osteoclast precursors // *Materials Science and Engineering: C*. 2018. Vol. 93. P. 1027–1035.
305. Su Y., Li K., Zhu X., Wang C., Zhang Y. Microwave-hydrothermal method post-treatment of sprayed Ca-P coating // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45, No. 1. P. 874–884.
306. Su Y., Li K., Hou X., He S. Surface defects repairing of sprayed Ca-P coating by the microwave-hydrothermal method // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44, No. 17. P. 21699–21709.
307. Etminanfar M.R., Khalil-Allafi J., Montaseri A., Vatankhah-Barenji R. Endothelialization and the bioactivity of Ca-P coatings of different Ca/P stoichiometry electrodeposited on the Nitinol superelastic alloy // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 62. P. 28–35.

308. Yang X., Zhang B., Lu J., Chen J., Zhang X., Gu Z. Biomimetic Ca-P coating on pre-calcified Ti plates by electrodeposition method // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 256, No. 9. P. 2700–2704.
309. LeGeros J.P., Lin S.J., Mijares D., Dimaano F., LeGeros R.Z. Electrochemically deposited calcium phosphate coating on titanium alloy substrates. 2005. P. 247–250. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.284-286.247
310. Tan L.L., Wang Q., Geng F., Xi X.S., Qiu J.H., Yang K. Preparation and characterization of Ca-P coating on AZ31 magnesium alloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2010. Vol. 20, No. 2. P. s648–s654.
311. Wan P., Tan L., Yang K. Surface modification on biodegradable magnesium alloys as orthopedic implant materials to improve the bio-adaptability: A review // *Journal of Materials Science & Technology*. 2016. Vol. 32, No. 9. P. 827–834.
312. Matykina E., Garcia I., Arrabal R., Mohedano M., Mingo B., Sancho J., Merino M.C., Pardo A. Role of PEO coatings in long-term biodegradation of a Mg alloy // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 389. P. 810–823.
313. Mohedano M., Luthringer B.J.C., Mingo B., Feyerabend F., Arrabal R., Sanchez-Egido P.J., Blawert C., Willumeit-Römer R., Zheludkevich M.L., et al. Bioactive plasma electrolytic oxidation coatings on Mg-Ca alloy to control degradation behaviour // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 315. P. 454–467.
314. Gao Y., Yerokhin A., Matthews A. Effect of current mode on PEO treatment of magnesium in Ca- and P-containing electrolyte and resulting coatings // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 316. P. 558–567.
315. Li L.-Y., Cui L.-Y., Zeng R.-C., Li S.-Q., Chen X.-B., Zheng Y., Kannan M.B. Advances in functionalized polymer coatings on biodegradable magnesium alloys – A review // *Acta Biomaterialia*. 2018. Vol. 79. P. 23–36.
316. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Minaev A.N., Gnedenkov S.V. Multifunctional coatings with self-healing effect on ma8 magnesium alloy // *Chemical Engineering*. 2024. Vol. 25 (5). P. 162–474. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Филонина В.С., Минаев А.Н., Гнеденков С.В. Многофункциональные покрытия с эффектом самозалечивания на сплаве магния МА8 // *Химическая технология*. 2024. Vol. 25, № 5. С. 162–474.]
317. Rezwan K., Chen Q.Z., Blaker J.J., Boccaccini A.R. Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering // *Biomaterials*. 2006. Vol. 27, No. 18. P. 3413–3431.
318. Sun J., Zhu Y., Meng L., Chen P., Shi T., Liu X., Zheng Y. Electrophoretic deposition of colloidal particles on Mg with cytocompatibility, antibacterial performance, and corrosion resistance // *Acta Biomaterialia*. 2016. Vol. 45. P. 387–398.
319. Blacklock J., Sievers T.K., Handa H., You Y.Z., Oupický D., Mao G., Möhwald H. Cross-linked bioreducible layer-by-layer films for increased cell adhesion and transgene expression // *Journal of Physical Chemistry B*. 2010. Vol. 114, No. 16. P. 5283–5291.
320. Vandrovcova M., Douglas T.E.L., Mróz W., Musial O., Schaubroeck D., Budner B., Syroka R., Dubruel P., Bacakova L. Pulsed laser deposition of magnesium-doped calcium phosphate coatings on porous polycaprolactone scaffolds produced by rapid prototyping // *Materials Letters*. 2015. Vol. 148. P. 178–183.
321. Wong H.M., Zhao Y., Leung F.K.L., Xi T., Zhang Z., Zheng Y., Wu S., Luk K.D.K., Cheung K.M.C., et al. Functionalized polymeric membrane with enhanced mechanical and biological properties to control the degradation of magnesium alloy // *Advanced Healthcare Materials*. 2017. Vol. 6, No. 8. P. 1601269.
322. Domingos M., Intrantuovo F., Gloria A., Gristina R., Ambrosio L., Bártolo P.J., Favia P. Improved osteoblast cell affinity on plasma-modified 3-D extruded PCL scaffolds // *Acta Biomaterialia*. 2013. Vol. 9, No. 4. P. 5997–6005.
323. Dash T.K., Konkimalla V.B. Poly-ε-caprolactone based formulations for drug delivery and tissue engineering: A review // *Journal of Controlled Release*. 2012. Vol. 158, No. 1. P. 15–33.
324. Li L.H., Sankara Narayanan T.S.N., Kim Y.K., Kong Y.M., Park I.S., Bae T.S., Lee M.H. Deposition of microarc oxidation-polycaprolactone duplex coating to improve the corrosion resistance of magnesium for biodegradable implants // *Thin Solid Films*. 2014. Vol. 562. P. 561–567.
325. Zomorodian A., Garcia M.P., Moura e Silva T., Fernandes J.C.S., Fernandes M.H., Montemor M.F. Biofunctional composite coating architectures based on polycaprolactone and nanohydroxyapatite for controlled corrosion activity and enhanced biocompatibility of magnesium AZ31 alloy // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. Vol. 48, No. 1. P. 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.027>.

326. Mavis B., Demirtaş T.T., Gümüşderelioğlu M., Gündüz G., Çolak Ü. Synthesis, characterization and osteoblastic activity of polycaprolactone nanofibers coated with biomimetic calcium phosphate // *Acta Biomaterialia*. 2009. Vol. 5, No. 8. P. 3098–3111.
327. Xu W., Yagoshi K., Koga Y., Sasaki M., Niidome T. Optimized polymer coating for magnesium alloy-based bioresorbable scaffolds for long-lasting drug release and corrosion resistance // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2018. Vol. 163. P. 100–106.
328. Wong H.M., Yeung K.W.K., Lam K.O., Tam V., Chu P.K., Luk K.D.K., Cheung K.M.C. A biodegradable polymer-based coating to control the performance of magnesium alloy orthopaedic implants // *Biomaterials*. 2010. Vol. 31, No. 8. P. 2084–2096.
329. Xu L., Yamamoto A. Characteristics and cytocompatibility of biodegradable polymer film on magnesium by spin coating // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2012. Vol. 93. P. 67–74.
330. Abdal-hay A., Dewidar M., Lim J.K. Biocorrosion behavior and cell viability of adhesive polymer coated magnesium based alloys for medical implants // *Applied Surface Science*. 2012. Vol. 261. P. 536–546.
331. Shi Z., Liu M., Atrens A. Measurement of the corrosion rate of magnesium alloys using Tafel extrapolation // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52, No. 2. P. 579–588.
332. Maki Y., Kashiwagi S., Kimizuka Y. Laser vaccine adjuvants: Light-augmented immune responses // *Vaccine*. 2021. Vol. 39, No. 46. P. 6805–6812.
333. Katdare A., Thakkar S., Dhepale S., Khunt D., Misra M. Fatty acids as essential adjuvants to treat various ailments and their role in drug delivery: A review // *Nutrition*. 2019. Vol. 65. P. 138–157.
334. Lei E., Vacy K., Boon W.C. Fatty acids and their therapeutic potential in neurological disorders // *Neurochemistry International*. 2016. Vol. 95. P. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2016.02.014>
335. Kelm G.R., Wickett R.R. The role of fatty acids in cosmetic technology // *Fatty Acids*. 2017. P. 385–404.
336. Yuan Y., Zhang N., Tao W., Cao X., He Y. Fatty acids as phase change materials: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 482–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.107>
337. Pantoja M., Alvarado T., Cakmak M., Cavicchi K.A. Stearic acid infused polyurethane shape memory foams // *Polymer*. 2018. Vol. 153. P. 131–138.
338. Ahmad M.U. Fatty acids: Chemistry, Synthesis, and Applications. American Oil Chemists' Society, 2017. 593 p.
339. Patti A., Lecocq H., Serghei A., Acierno D., Cassagnau P. The universal usefulness of stearic acid as surface modifier: applications to the polymer formulations and composite processing // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 96. P. 1–33.
340. Shaki H., Vasheghani-Farahani E., Ganji F., Jafarzadeh-Holagh S., Taebnia N., Dolatshahi-Pirouz A. A self assembled dextran-stearic acid-spermine nanocarrier for delivery of rapamycin as a hydrophobic drug // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2021. Vol. 66. P. 102768.
341. Öztürk A.A., Aygül A., Şenel B. Influence of glyceryl behenate, tripalmitin and stearic acid on the properties of clarithromycin incorporated solid lipid nanoparticles (SLNs): Formulation, characterization, antibacterial activity and cytotoxicity // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2019. Vol. 54. P. 101240.
342. Khalifeh S., Burleigh T.D. Super-hydrophobic stearic acid layer formed on anodized high purified magnesium for improving corrosion resistance of bioabsorbable implants // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2018. Vol. 6, No. 4. P. 327–336.
343. Zhang L., Mohammed E.A.A., Adriaens A. Synthesis and electrochemical behavior of a magnesium fluoride-polydopamine-stearic acid composite coating on AZ31 magnesium alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 307. P. 56–64.
344. Zhou Y.Y., Du Y.Z., Wang L., Yuan H., Zhou J.P., Hu F.Q. Preparation and pharmacodynamics of stearic acid and poly (lactic-co-glycolic acid) grafted chitosan oligosaccharide micelles for 10-hydroxycamptothecin // *International Journal of Pharmaceutics*. 2010. Vol. 393, No. 1–2. P. 144–152.
345. Robson H., Craig D.Q.M., Deutsch D. An investigation into the release of cefuroxime axetil from taste-masked stearic acid microspheres. III. The use of DSC and HSDSC as means of characterising the interaction of the microspheres with buffered media // *International Journal of Pharmaceutics*. 2000. Vol. 201, No. 2. P. 211–219.
346. Feng Y., Chen S., Frank Cheng Y. Stearic acid modified zinc nano-coatings with superhydrophobicity and enhanced antifouling performance // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 340. P. 55–65.

347. Liu X., Zhang T.C., He H., Ouyang L., Yuan S. A stearic Acid/CeO₂ bilayer coating on AZ31B magnesium alloy with superhydrophobic and self-cleaning properties for corrosion inhibition // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 834. P. 155210.
348. Hu C., Xie X., Ren K. A facile method to prepare stearic acid-TiO₂/zinc composite coating with multipronged robustness, self-cleaning property, and corrosion resistance // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 882. P. 160636.
349. Shi S.C., Peng Y.Q. Preparation and tribological studies of stearic acid-modified biopolymer coating // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 138. P. 105304.
350. Zhang Q., Wan Y., Li Y., Yang S., Yao W. Friction reducing behavior of stearic acid film on a textured aluminum substrate // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 280. P. 545–549.
351. Calvo B., Cepeda E.A. Solubilities of stearic acid in organic solvents and in azeotropic solvent mixtures // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2008. Vol. 53, No. 3. P. 628–633.
352. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Gnedenkov S.V. Effect of stearic acid on corrosion inhibition in magnesium-based materials // *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 11. P. 53–61. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синибрюхов С.Л., Филонова В.С., Гнеденков С.В. Влияние стеариновой кислоты на ингибирование процесса коррозии материалов на основе магния // *Цветные металлы*. 2023. № 11. С. 53–61.]
353. Noubigh A. Stearic acid solubility in mixed solvents of (water + ethanol) and (ethanol + ethyl acetate): Experimental data and comparison among different thermodynamic models // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 296. P. 112101.
354. Smith G.P.S., McLaughlin A.W., Clarkson A.N., Gordon K.C., Walker G.F. Raman microscopic imaging of electrospun fibers made from a polycaprolactone and polyethylene oxide blend // *Vibrational Spectroscopy*. 2017. Vol. 92. P. 27–34.
355. Mantecón-Oria M., Diban N., Berciano M.T., Rivero M.J., David O., Lafarga M., Tapia O., Urutiaga A. Hollow fiber membranes of PCL and PCL/graphene as scaffolds with potential to develop in vitro blood- brain barrier // *Membranes*. 2020. Vol. 10, No. 8. P. 1–18.
356. Kotula A.P., Snyder C.R., Migler K.B. Determining conformational order and crystallinity in polycaprolactone via Raman spectroscopy // *Polymer*. 2017. Vol. 117. P. 1–10.
357. Muñoz-Escobar A., Reyes-López S.Y. Antifungal susceptibility of *Candida* species to copper oxide nanoparticles on polycaprolactone fibers (PCL-CuONPs) // *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 0228864.
358. Unalan I., Slavik B., Buettner A., Goldmann W.H., Frank G., Boccaccini A.R. Physical and antibacterial properties of peppermint essential oil loaded poly(ϵ -caprolactone) (PCL) electrospun fiber mats for wound healing // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. Vol. 7. P. 00346.
359. Ermeýdan M.A., Cabane E., Hass P., Koetz J., Burgert I. Fully biodegradable modification of wood for improvement of dimensional stability and water absorption properties by poly(ϵ -caprolactone) grafting into the cell walls // *Green Chemistry*. 2014. Vol. 16, No. 6. P. 3313–3321.
360. Hartman O., Zhang C., Adams E.L., Farach-Carson M.C., Petrelli N.J., Chase B.D., Rabolt J.F. Biofunctionalization of electrospun PCL-based scaffolds with perlecan domain IV peptide to create a 3-D pharmacokinetic cancer model // *Biomaterials*. 2010. Vol. 31, No. 21. P. 5700–5718.
361. Kister G., Cassanas G., Bergounhon M., Hoarau D., Vert M. Structural characterization and hydrolytic degradation of solid copolymers of D, L-lactide-co- ϵ -caprolactone by Raman spectroscopy // *Polymer*. 2000. Vol. 41, No. 3. P. 925–932.
362. Taddei P., Tinti A., Fini G. Vibrational spectroscopy of polymeric biomaterials // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2001. Vol. 32, No. 8. P. 619–629.
363. Baranowska-Korczyn A., Warowicka A., Jasiurkowska-Delaporte M., Grzeskowiak B., Jarek M., Maciejewska B.M., Jurga-Stopa J., Jurga S. Antimicrobial electrospun poly(ϵ -caprolactone) scaffolds for gingival fibroblast growth // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6, No. 24. P. 19647–19656.
364. Parsaie A., Mohammadi-Khanaposhntani M., Riazi M., Tamsilian Y. Magnesium stearate-coated superhydrophobic sponge for oil/water separation: Synthesis, properties, application // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 251. P. 117105.
365. De Veij M., Vandenabeele P., De Beer T., Remon J.P., Moens L. Reference database of Raman spectra of pharmaceutical excipients // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2009. Vol. 40, No. 3. P. 297–307.

366. Eshelman E., Daly M.G., Slater G., Dietrich P., Gravel J.F. An ultraviolet Raman wavelength for the in-situ analysis of organic compounds relevant to astrobiology // *Planetary and Space Science*. 2014. Vol. 93–94. P. 65–70.
367. Mars K., Lioe D.X., Kawahito S., Yasutomi K., Kagawa K., Yamada T., Hashimoto M. Label-free biomedical imaging using high-speed lock-in pixel sensor for stimulated Raman scattering // *Sensors (Switzerland)*. 2017. Vol. 17, No. 11. P. 2581.
368. Lothenbach B., Nied D., L'Hôpital E., Achiedo G., Dauzères A. Magnesium and calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 77. P. 60–68.
369. Cao F., Shi Z., Song G.L., Liu M., Atrens A. Corrosion behaviour in salt spray and in 3.5% NaCl solution saturated with $\text{Mg}(\text{OH})_2$ of as-cast and solution heat-treated binary Mg-X alloys: X=Mn, Sn, Ca, Zn, Al, Zr, Si, Sr // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 76. P. 60–97.
370. Vaghefinazari B., Wang C., Mercier D., Mei D., Seyeux A., Marcus P., Blawert C., Lamaka S.V., Zheludkevich M.L. Adverse effect of 2,5PDC corrosion inhibitor on PEO coated magnesium // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 192. P. 109830.
371. Mei D., Lamaka S.V., Lu X., Zheludkevich M.L. Selecting medium for corrosion testing of bioabsorbable magnesium and other metals – A critical review // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 171. P. 108722.
372. Matsuda T., Jadhav N., Kashi K.B., Jensen M., Suryawanshi A., Gelling V.J. Self-healing ability and particle size effect of encapsulated cerium nitrate into pH sensitive microcapsules // *Progress in Organic Coatings*. 2016. Vol. 90. P. 425–430.
373. An K., Sui Y., Wang Y., Qing Y., Long C., Liu X., Shang Y., Liu C. Synergistic control of wetting resistance and corrosion inhibition by cerium to enhance corrosion resistance of superhydrophobic coating // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. Vol. 653. P. 129874.
374. Guo J., Liu X., Du K., Guo Q., Wang Y., Liu Y., Feng L. An anti-stripping and self-healing micro-arc oxidation/acrylamide gel composite coating on magnesium alloy AZ31 // *Materials Letters*. 2020. Vol. 260. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126912>
375. Zahedi Asl V., Zhao J., Anjum M.J., Wei S., Wang W., Zhao Z. The effect of cerium cation on the microstructure and anti-corrosion performance of LDH conversion coatings on AZ31 magnesium alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 821. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153248>
376. Zimou J., Nouneh K., Hsissou R., El-Habib A., Gana L., El, Talbi A., Beraich M., Lotfi N., Addou M. Structural, morphological, optical, and electrochemical properties of Co-doped CeO_2 thin films // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2021. Vol. 135. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106049>
377. Weber W.H., Hass K.C., McBride J.R. Raman study of CeO_2 : Second-order scattering, lattice dynamics, and particle-size effects // *Physical Review B*. 1993. Vol. 48, No. 1. <https://doi.org/10.1103/physrevb.48.178>
378. Luisetto I., Tuti S., Romano C., Boaro M., Di Bartolomeo E. Dry reforming of methane over Ni supported on doped CeO_2 : New insight on the role of dopants for CO_2 activation // *Journal of CO_2 Utilization*. 2019. Vol. 30. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.01.006>
379. Strenaer R., Guhel Y., Brocero G., Gaquière C., Boudart B. Self-heating temperature measurement in AlInN/GaN HEMTs by using CeO_2 and TiO_2 micro-Raman thermometers // *Microelectronics Reliability*. 2022. Vol. 138. P. 114693. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2022.114693>
380. Boudelloua H., Hamlaoui Y., Tifouti L., Pedraza F. Effects of polyethylene glycol (PEG) on the corrosion inhibition of mild steel by cerium nitrate in chloride solution // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 473. P. 449–460.
381. Loridant S. Raman spectroscopy as a powerful tool to characterize ceria-based catalysts // *Catalysis Today*. 2021. Vol. 373. P. 98–111.
382. Uekawa N., Kobayashi M., Kojima T. Photochromic property of cerium oxide nanoparticles prepared by dialysis of solution of cerium nitrate // *Results in Chemistry*. 2022. Vol. 4. P. 100506.
383. Ma X., Lu P., Wu P. Structural, optical and magnetic properties of CeO_2 nanowires with nonmagnetic Mg^{2+} doping // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 734. P. 22–28.
384. Wang P., Meng F., Gao C., Xie W., Wang J., Li A. Structural, morphological and optical characteristics of fusiform Co-doped CeO_2 via a facile hydrothermal method // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018. Vol. 29, No. 13. P. 11482–11488.

385. Kumar P., Ahmad B., Chand F., Asokan K. Magnetic and electronic structures of Co ion implanted CeO₂ thin films // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 452. P. 217–222.
386. Murugan R., Vijayaprasath G., Thangaraj M., Mahalingam T., Rajendran S., Arivanandhan M., Loganathan A., Hayakawa Y., Ravi G. Defect assisted room temperature ferromagnetism on rf sputtered Mn doped CeO₂ thin films // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43, No. 1. P. 399–406.
387. Zapata F., García-Ruiz C. The discrimination of 72 nitrate, chlorate and perchlorate salts using IR and Raman spectroscopy // *Spectrochimica Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2018. Vol. 189. P. 535–542.
388. Yang Y., He C., Dianyu E., Yang W., Qi F., Xie D., Shen L., Peng S., Shuai C. Mg bone implant: Features, developments and perspectives // *Materials & Design*. 2020. Vol. 185. P. 108259.
389. Kumar S., Katyal P., Chaudhary R.N., Singh V. Assessment of factors influencing bio-corrosion of magnesium based alloy implants: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. P. 2680–2689.
390. Rahman M., Li Y., Wen C. HA coating on Mg alloys for biomedical applications: A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8, No. 3. P. 929–943.
391. Amiri H., Mohammadi I., Afshar A. Electrophoretic deposition of nano-zirconia coating on AZ91D magnesium alloy for bio-corrosion control purposes // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 311. P. 182–190.
392. Sharma M.K., Jang Y., Kim J., Kim H., Jung J.P. Plasma electrolytic oxidation in surface modification of metals for electronics // *Journal of Welding and Joining*. 2014. Vol. 32, No. 3. P. 27–33. <https://doi.org/10.5781/jwj.2014.32.3.27>.
393. Stojadinović S. Plasma electrolytic oxidation of metals // *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2013. Vol. 78, No. 5. P. 713–716.
394. Egorkin V.S., Gnedkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyaliy I.E., Gnedkov A.S., Chizhikov R.G. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 334. P. 29–42.
395. Gnedkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Gnedkov S.V. New hybrid coatings for degradation rate control of MA8 magnesium alloy // *Chemical Engineering*. 2023. Vol. 24 (11). P. 402–414. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синебрюхов С., Филонина В.С., Гнеденков С.В. Новые гибридные покрытия для контроля скорости деградации магниевого сплава МА8 // *Химическая технология*. 2023. Vol. 24, № 11. С. 402–414.]
396. Gnedkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Gnedkov S.V. Oleate-containing biocompatible coatings for protection of biodegradable magnesium implants // *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 9. P. 37–45. (In Russ.). [Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Филонина В.С., Гнеденков С.В. Олеатсодержащие биосовместимые покрытия для защиты биodeградируемых магниевых имплантатов // *Цветные металлы*. 2023. № 9. С. 37–45.]
397. Sun M., Matthews A., Yerokhin A. Plasma electrolytic oxidation coatings on cp-Mg with cerium nitrate and benzotriazole immersion post-treatments // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 344. P. 330–341.
398. Choi S.H., Park T.G. Hydrophobic ion pair formation between leuprolide and sodium oleate for sustained release from biodegradable polymeric microspheres // *International Journal of Pharmaceutics*. 2000. Vol. 203, No. 1–2. P. 193–202.
399. Kameshima Y., Sasaki H., Isobe T., Nakajima A., Okada K. Synthesis of composites of sodium oleate/Mg-Al-ascorbic acid-layered double hydroxides for drug delivery applications // *International Journal of Pharmaceutics*. 2009. Vol. 381, No. 1. P. 34–39.
400. Sun S., Cui F., Kawashima Y., Liang N., Zhang L., Shi K., Yu Y. A novel insulin-sodium oleate complex for oral administration: Preparation, characterization and in vivo evaluation // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2008. Vol. 18, No. 4. P. 239–243.
401. Wang Y., Zuo Y., Tang Y. Inhibition effect and mechanism of sodium oleate on passivation and pitting corrosion of steel in simulated concrete pore solution // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 167. P. 197–204.
402. Luo H., Guan Y.C., Han K.N. Inhibition of mild steel corrosion by sodium dodecyl benzene sulfonate and sodium oleate in acidic solutions // *Corrosion*. 1998. Vol. 54, No. 8. P. 619–627.
403. Chirkunov A.A., Rakoch A.G., Monakhova E.V., Gladkova A.A., Khabibullina Z.V., Ogorodnikova V.A., Serdechnova M., Blawert C., Kuznetsov Y.I., et al. Corrosion protection of magnesium alloy by PEO-coatings

- containing sodium oleate // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2019. Vol. 8, No. 4. P. 1170–1188.
404. Dhanasekaran N.P.D., Muthuvelu K.S., Arumugasamy S.K. Recent advancement in biomedical applications of polycaprolactone and polycaprolactone-based materials // *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*. 2022. P. 795–809.
 405. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Vyalyi I.E., Imshinetskii I.M., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Kul'chin Yu.N. Anticorrosion protection of magnesium obtained by direct laser deposition. // *Vestnik of the FEB RAS*. 2018. No. 5. P. 103–112. (In Russ.). [Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Гнеденков А.С., Вялый И.Е., Имшинецкий И.М., Егоркин В.С., Маштальер Д.В., Надарая К.В., Кульчин Ю.Н. Противокоррозионная защита магния, получаемого лазерной порошковой наплавкой // *Вестник ДВО РАН*. 2018. № 5. С. 103–112.]
 406. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Zavidnaya A.G., Sinebrukhov S.L., Gordienko P.S., Iwatsubo S., Matsui A. Composition and adhesion of protective coatings on aluminum // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 145, No. 1–3. P. 146–151.
 407. Lin M., Nemcova A., Voevodin A.A., Korenyi-Both A., Liskiewicz T.W., Laugel N., Matthews A., Yerokhin A. Surface characteristics underpinning fretting wear performance of heavily loaded duplex chameleon/PEO coatings on Al // *Tribology International*. 2021. Vol. 154. P. 106723.
 408. Mingo B., Arrabal R., Mohedano M., Llamazares Y., Matykina E., Yerokhin A., Pardo A. Influence of sealing post-treatments on the corrosion resistance of PEO coated AZ91 magnesium alloy // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 433. P. 653–667.
 409. Yerokhin A., Parfenov E.V., Matthews A. In situ impedance spectroscopy of the plasma electrolytic oxidation process for deposition of Ca- and P-containing coatings on Ti // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 301. P. 54–62.
 410. Wieduwilt F., Lenth C., Ctistis G., Plachetka U., Möller M., Wackerbarth H. Evaluation of an on-site surface enhanced Raman scattering sensor for benzotriazole // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 8260.
 411. Chan H.Y.H., Weaver M.J. Vibrational structural analysis of benzotriazole adsorption and phase film formation on copper using surface-enhanced Raman spectroscopy // *Langmuir*. 1999. Vol. 15, No. 9. P. 3348–3355.
 412. Thomas S., Venkateswaran S., Kapoor S., D'Cunha R., Mukherjee T. Surface enhanced Raman scattering of benzotriazole: A molecular orientational study // *Spectrochimica Acta – Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2004. Vol. 60, No. 1–2. P. 25–29.
 413. Chrissanthopoulos A., Bouropoulos N., Yannopoulos S.N. Vibrational spectroscopic and computational studies of sol-gel derived CaO-MgO-SiO₂ binary and ternary bioactive glasses // *Vibrational Spectroscopy*. 2008. Vol. 48, No. 1. P. 118–125.
 414. Suga K., Kondo D., Otsuka Y., Okamoto Y., Umakoshi H. Characterization of aqueous oleic acid/oleate dispersions by fluorescent probes and Raman spectroscopy // *Langmuir*. 2016. Vol. 32, No. 30. P. 7606–7612.
 415. Milsom A., Squires A.M., Boswell J.A., Terrill N.J., Ward A.D., Pfrang C. An organic crystalline state in ageing atmospheric aerosol proxies: Spatially resolved structural changes in levitated fatty acid particles // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21, No. 19. P. 15003–15021.
 416. Zhu G., Zhang T., Chen M., Yao K., Huang X., Zhang B., Li Y., Liu J., Wang Y., et al. Bone physiological microenvironment and healing mechanism: Basis for future bone-tissue engineering scaffolds // *Bioactive Materials*. 2021. Vol. 6, No. 11. P. 4110–4140.
 417. Jang I.G., Kim I.Y. Computational study of Wolff's law with trabecular architecture in the human proximal femur using topology optimization // *Journal of Biomechanics*. 2008. Vol. 41, No. 11. P. 2353–2361.
 418. Wagener V., Virtanen S. Influence of electrolyte composition (simulated body fluid vs. Dulbecco's modified Eagle's medium), temperature, and solution flow on the biocorrosion behavior of commercially pure Mg // *Corrosion. NACE International*, 2017. Vol. 73, No. 12. P. 1413–1422.
 419. Zhukova Yu.L. [Preparation and properties study of superelastic Ti-Nb-Ta, Ti-Nb-Zr alloys for medical application]: thesis ... Cand. of Sci. (Chemistry). The National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 2013. (In Russ.). [Жукова Ю.Л. Получение и исследование свойств сверхупругих сплавов Ti-Nb-Ta, Ti-Nb-Zr медицинского назначения: дис. ... канд. хим. наук. М., Национальный исслед. технол. университет «МИСИС», 2013.]

420. Chen Q., Lu X., Serdechnova M., Wang C., Lamaka S., Blawert C., Zheludkevich M.L., Wang F. Formation of self-healing PEO coatings on AM50 Mg by in-situ incorporation of zeolite micro-container // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 209. P. 110785.
421. Li J., He N., Li J., Fu Q., Feng M., Jin W., Li W., Xiao Y., Yu Z., et al. A silicate-loaded MgAl LDH self-healing coating on biomedical Mg alloys for corrosion retardation and cytocompatibility enhancement // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 439. P. 128442.
422. Shulha T., Serdechnova M., Lamaka S. V., Lu X., Feiler C., Blawert C., Zheludkevich M.L. Corrosion inhibitors intercalated into layered double hydroxides prepared *in situ* on AZ91 magnesium alloys: Structure and protection ability // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. Vol. 15, No. 4. P. 6098–6112.
423. Evans D.G., Slade R.C.T. Structural aspects of layered double hydroxides. 2005. 87 p.
424. Xu Z., Wu Y., Zhang Z., Wang Y., Hu J., Ma Y., Zhang Z., Huang H., Wei J., et al. A review on the research progress of LDHs as corrosion inhibitors for reinforced concrete // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 70. P. 106303.
425. Kasneryk V., Serdechnova M., Blawert C., Zheludkevich M.L. LDH has been grown: What is next? Overview on methods of post-treatment of LDH conversion coatings // *Applied Clay Science*. 2023. Vol. 232. P. 106774.
426. Pan S.-Q., Zhang F., Wen C., Zeng R.-C. Advances in Mg–Al-layered double hydroxide steam coatings on Mg alloys: A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 5. P. 1505–1518.
427. Karim A.V., Hassani A., Eghbali P., Nidheesh P.V. Nanostructured modified layered double hydroxides (LDHs)-based catalysts: A review on synthesis, characterization, and applications in water remediation by advanced oxidation processes // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2022. Vol. 26, No. 1. P. 100965.
428. Wan L., Wang P. Recent progress on self-supported two-dimensional transition metal hydroxides nanosheets for electrochemical energy storage and conversion // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, No. 12. P. 8356–8376.
429. Williams G.R., Khan A.I., O'Hare D. Mechanistic and kinetic studies of guest ion intercalation into layered double hydroxides using time-resolved, in-situ X-ray powder diffraction // *Layered Double Hydroxides*. 2005. P. 161–192. https://doi.org/10.1007/430_002
430. Pillado B., Mingo B., del Olmo R., Matykina E., Kooijman A.M., Gonzalez-Garcia Y., Arrabal R., Mohedano M. LDH conversion films for active protection of AZ31 Mg alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 201–216.
431. Li J., Luo M., Chen Z., Zhuang E., Yu B., Chen Y., Nong Y. Anti-corrosion mechanism of MgAl-LDHs inhibitors with varying anionic charge on reinforcing steel in simulated concrete pore solutions // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 363. P. 129882.
432. Wang D., Zhu Q., Su Y., Li J., Wang A., Xing Z. Preparation of MgAlFe-LDHs as a deicer corrosion inhibitor to reduce corrosion of chloride ions in deicing salts // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. Vol. 174. P. 164–174.
433. Kameshima Y., Yoshizaki H., Nakajima A., Okada K. Preparation of sodium oleate/layered double hydroxide composites with acid-resistant properties // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 298, No. 2. P. 624–628.
434. Tabish M., Zhao J., Wang J., Anjum M.J., Qiang Y., Yang Q., Mushtaq M.A., Yasin G. Improving the corrosion protection ability of epoxy coating using CaAl LDH intercalated with 2-mercaptobenzothiazole as a pigment on steel substrate // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 165. P. 106765.
435. Rodriguez J., Bollen E., Nguyen T.D., Portier A., Paint Y., Olivier M.-G. Incorporation of layered double hydroxides modified with benzotriazole into an epoxy resin for the corrosion protection of Zn-Mg coated steel // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 149. P. 105894.
436. Shulha T., Serdechnova M., Iuzviuk M.H., Zobjkalo I.A., Karlova P., Scharnagl N., Wieland D.C.F., Lamaka S.V., Yaremchenko A.A., et al. In situ formation of LDH-based nanocontainers on the surface of AZ91 magnesium alloy and detailed investigation of their crystal structure // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10, No. 5. P. 1268–1285.
437. Li C.-Y., Gao L., Fan X.-L., Zeng R.-C., Chen D.-C., Zhi K.-Q. In vitro degradation and cytocompatibility of a low temperature in-situ grown self-healing Mg-Al LDH coating on MAO-coated magnesium alloy AZ31 // *Bioactive Materials*. 2020. Vol. 5, No. 2. P. 364–376.

438. Zhang G., Wu L., Serdechnova M., Tang A., Wang C., Blawert C., Pan F., Zheludkevich M.L. In-situ LDHs growth on PEO coatings on AZ31 magnesium alloy for active protection: Roles of PEO composition and conversion solution // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 7. P. 2376-2391. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.001>
439. Mohedano M., Serdechnova M., Strykevich M., Karpushenkov S., Bouali A.C., Ferreira M.G.S., Zheludkevich M.L. Active protective PEO coatings on AA2024: Role of voltage on in-situ LDH growth // *Materials & Design*. 2017. Vol. 120. P. 36–46.
440. Bokati Sabet K., Dehghanian C. Adsorption behavior of 1H-benzotriazole corrosion inhibitor on aluminum alloy 1050, mild steel and copper in artificial seawater // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6, No. 2. P. 1613–1624.
441. Wan S., Miao C.-H., Wang R.-M., Zhang Z.-F., Dong Z.-H. Enhanced corrosion resistance of copper by synergetic effects of silica and BTA codoped in polypyrrole film // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 129. P. 187–198.
442. Wang J., Zhao J., Tabish M., Shi F., Fan B., Peng L., Cheng Q. Intelligent anticorrosion coating based on mesostructured BTA@mCeO₂/g-C₃N₄ nanocomposites for inhibiting the filiform corrosion of Zn-Mg-Al coated steel // *Corrosion Science*. 2023. Vol. 221. P. 111331.
443. Nóvoa X.R., Pérez C. The use of smart coatings for metal corrosion control // *Current Opinion in Electrochemistry*. 2023. Vol. 40. P. 101324.
444. Chen G., Jin B., Li Y., He Y., Luo J. A smart healable anticorrosion coating with enhanced loading of benzotriazole enabled by ultra-highly exfoliated graphene and mussel-inspired chemistry // *Carbon*. 2022. Vol. 187. P. 439–450.
445. Chen G., Jin B., Li Y., Zhang Z., He Y., Luo J. Controllable group tailoring enables enhanced pH-responsive behaviors of polydopamine delivery system in smart self-healing anticorrosion coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 170. P. 106989.
446. Zahedi Asl V., Zhao J., Palizdar Y., Junaid Anjum M. Influence of pH value and Zn/Ce cations ratio on the microstructures and corrosion resistance of LDH coating on AZ31 // *Corrosion Communications*. 2022. Vol. 5. P. 73–86.
447. Ogawa M., Kaiho H. Homogeneous precipitation of uniform hydrotalcite particles // *Langmuir*. 2002. Vol. 18, No. 11. P. 4240–4242.
448. Chen Y., Wu L., Yao W., Wu J., Xie Z., Yuan Y., Jiang B., Pan F. In situ growth of Mg-Zn-Al LDHs by ZIF-8 carrying Zn source and micro-arc oxidation integrated coating for corrosion and protection of magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 451. P. 129032.
449. Yoganandan G., Pradeep Premkumar K., Balaraju J.N. Evaluation of corrosion resistance and self-healing behavior of zirconium-cerium conversion coating developed on AA2024 alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 270. P. 249–258.
450. Chen Y., Yang Y., Zhang T., Zhang W., FuhuiWang, Lu X., Blawert C., Zheludkevich M.L. Interaction effect between different constituents in silicate-containing electrolyte on PEO coatings on Mg alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 307. P. 825–836.
451. Song G.L., Atrens A. Corrosion mechanisms of magnesium alloys // *Advanced Engineering Materials*. 1999. Vol. 1, No. 1. P. 11–33.
452. Gnedenkov A.S., Nomerovskii A.D., Tsvetnikov A.K., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. Cold-sprayed composite metal-fluoropolymer coatings for alloy protection against corrosion and wear // *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 3. P. 918.
453. Rodriguez J., Mouanga M., Roobroeck A., Cossement D., Mirisola A., Olivier M.-G. Study of the inhibition ability of benzotriazole on the Zn-Mg coated steel corrosion in chloride electrolyte // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 132. P. 56–67.
454. Lu X., Ma J., Mohedano M., Pillado B., Arrabal R., Qian K., Li Y., Zhang T., Wang F. Ca-based sealing of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ91 Mg alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 417. P. 127220.
455. Qian K., Li W., Lu X., Han X., Jin Y., Zhang T., Wang F. Effect of phosphate-based sealing treatment on the corrosion performance of a PEO coated AZ91D mg alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 1328–1340.

456. Zhang X., Zhang Y., Lv Y., Dong Z., Hashimoto T., Zhou X. Enhanced corrosion resistance of AZ31 Mg alloy by one-step formation of PEO/Mg-Al LDH composite coating // *Corrosion Communications*. 2022. Vol. 6. P. 67–83.
457. Lujun Z., Hongzhan L., Qingmei M., Jiangbo L., Zhengxian L. The mechanism for tuning the corrosion resistance and pore density of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on Mg alloy with fluoride addition // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 8. P. 2823–2832. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.10.007>
458. Shi Y., Li J., Wang H., Teng H. Study on corrosion properties and microstructure of PEO coatings formed on AZ31 Mg alloy // *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15, No. 6. P. 5846–5859.
459. Zhang F., Ju P., Pan M., Zhang D., Huang Y., Li G., Li X. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 144. P. 74–88.
460. Ashraf Ismail N., Moussa A.M., Kahraman R., Shakoor R.A. Study on the corrosion behavior of polymeric nanocomposite coatings containing halloysite nanotubes loaded with multicomponent inhibitor // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15, No. 9. P. 104107.
461. Adsul S.H., Siva T., Sathiyarayanan S., Sonawane S.H., Subasri R. Self-healing ability of nanoclay-based hybrid sol-gel coatings on magnesium alloy AZ91D // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 309. P. 609–620.
462. Lisuzzo L., Cavallaro G., Milioto S., Lazzara G. Halloysite nanotubes filled with salicylic acid and sodium diclofenac: effects of vacuum pumping on loading and release properties // *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 663–673.
463. Zheng H., Mei J., Liu F., Chen L., Li F., Zeng Q., Wang J.J. Preparation and characterization of carvacrol essential oil-loaded halloysite nanotubes and their application in antibacterial packaging // *Food Packaging and Shelf Life*. 2022. Vol. 34. P. 100972.
464. Wu W.X., Wang W.P., Lin H.C. A study on corrosion behavior of micro-arc oxidation coatings doped with 2-aminobenzimidazole loaded halloysite nanotubes on AZ31 magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 416. P. 127116.
465. Qureshi A., Habib S., Nawaz M., Shakoor R.A., Kahraman R., Ahmed E.M. Modified halloysite nanotubes decorated with Ceria for synergistic corrosion inhibition of Polyolefin based smart composite coatings // *Applied Clay Science*. 2023. Vol. 233. P. 106827.
466. Lisuzzo L., Cavallaro G., Pasbakhsh P., Milioto S., Lazzara G. Why does vacuum drive to the loading of halloysite nanotubes? The key role of water confinement // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 547. P. 361–369.
467. Ibrahim E.E., Chipara D.M., Thapa R., Lozano K., Chipara M. Raman spectroscopy of isotactic polypropylene-halloysite nanocomposites // *Journal of Nanomaterials*. 2012. Vol. 2012. P. 1–8.
468. Frost R.L. Intercalation of halloysite: A Raman spectroscopic study // *Clays and Clay Minerals*. 1997. Vol. 45, No. 4. P. 551–563.
469. Pacheco M., Aroso I.M., Silva J.M., Lamaka S.V., Bohlen J., Nienaber M., Letzig D., Lima E., Barros A.A., et al. Understanding the corrosion of Mg alloys in in vitro urinary tract conditions: A step forward towards a biodegradable metallic ureteral stent // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11, No. 11. P. 4301–4324. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.10.002>
470. Dai W.B., Yuan L.X., Li C.Y., He D., Jia D.W., Zhang Y.M. The effect of surface roughness of the substrate on fatigue life of coated aluminum alloy by micro-arc oxidation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 765. P. 1018–1025.
471. Ji S., Weng Y., Wu Z., Ma Z., Tian X., Fu R.K.Y., Lin H., Wu G., Chu P.K., et al. Excellent corrosion resistance of P and Fe modified micro-arc oxidation coating on Al alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 710. P. 452–459.
472. Truong P. Van, Bo N. Van, Minh N. Van, Anh N.V., Suresh Kumar G., Shkir M. Investigation of corrosion and wear resistance of PEO coated D16T aluminium alloys in the marine tropical climate conditions // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 290. P. 126587.
473. Xue W., Wu X., Li X., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte // *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 425, No. 1–2. P. 302–306.

474. Zhu M., Song Y., Liu Z., Xu D., Dong K., Han E.-H. Optimization of thermal control and corrosion resistance of PEO coatings on 7075 aluminum alloy by frequency alteration // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 446. P. 128797.
475. Wang P., Wu T., Xiao Y.T., Pu J., Guo X.Y. Effects of $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$ concentration on the properties of micro-arc oxidation coatings on ZL108 aluminum alloys // *Materials Letters*. 2016. Vol. 182. P. 27–31.
476. Blawert C., Dietzel W., Ghali E., Song G. Anodizing treatments for magnesium alloys and their effect on corrosion resistance in various environments // *Advanced Engineering Materials*. 2006. Vol. 8, No. 6. P. 511–533.
477. Lee K.M., Ko Y.G., Shin D.H. Incorporation of carbon nanotubes into micro-coatings film formed on aluminum alloy via plasma electrolytic oxidation // *Materials Letters*. 2011. Vol. 65, No. 14. P. 2269–2273.
478. Tang Y., Wu F., Fang L., Ruan H., Hu J., Zeng X., Zhang S., Luo H., Zhou M. Effect of deposition sequence of MgAl-LDH and SiO_2 @PDMS layers on the corrosion resistance of robust superhydrophobic/self-healing multifunctional coatings on magnesium alloy // *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 174, November 2022. P. 107299.
479. Feng L., Xing R., Wei Q., Yang Y., Li G., Liu F. Improvement in corrosion protective performance of polyacrylate coating based on corrosion inhibitors microcapsules // *Materials Letters*. 2023. Vol. 331, September 2022. P. 133514. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133514>
480. Zeng Q., Min X., Luo Z., Dai H., Liao B. In-situ preparation of superhydrophobic Zn-Al layered double hydroxide coatings for corrosion protection of aluminum alloy // *Materials Letters*. 2022. Vol. 328, August. P. 133077.
481. Samaei A., Chaudhuri S. Role of zirconium conversion coating in corrosion performance of aluminum alloys: An integrated first-principles and multiphysics modeling approach // *Electrochimica Acta*. 2022. Vol. 433, February. P. 141195.
482. Zhu M., Song Y., Dong K., Shan D., Han E.-H. Correlation between the transient variation in positive/negative pulse voltages and the growth of PEO coating on 7075 aluminum alloy // *Electrochimica Acta*. 2022. Vol. 411. P. 140056.
483. Nadimi M., Dehghanian C., Etemadmoghadam A. Influence of SiO_2 nanoparticles incorporating into ceramic coatings generated by PEO on aluminium alloy: Morphology, adhesion, corrosion, and wear resistance // *Materials Today Communications*. 2022. Vol. 31. P. 103587.
484. Rao Y., Wang Q., Oka D., Ramachandran C.S. On the PEO treatment of cold sprayed 7075 aluminum alloy and its effects on mechanical, corrosion and dry sliding wear performances thereof // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 383. P. 125271.
485. Lu C., Shi P., Yang J., Jia J., Xie E., Sun Y. Effects of surface texturing on the tribological behaviors of PEO/PTFE coating on aluminum alloy for heavy-load and long-performance applications // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, No. 6. P. 12149–12156.
486. Lu C., Feng X., Yang J., Jia J., Yi G., Xie E., Sun Y. Influence of surface microstructure on tribological properties of PEO-PTFE coating formed on aluminum alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 364. P. 127–134.
487. Pezzato L., Rigon M., Martucci A., Brunelli K., Dabalà M. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as pre-treatment for sol-gel coating on aluminum and magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 366. P. 114–123.
488. Zehra T., Fattah-alhosseini A., Kaseem M. Surface properties of plasma electrolytic oxidation coating modified by polymeric materials: A review // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 171. P. 107053.
489. Babaei K., Fattah-alhosseini A., Molaei M. The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: A review // *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 21. P. 100677.
490. Asan G., Asan A. Inhibitor effect of nicotinamide on corrosion of aluminum // *Journal of Molecular Structure*. 2020. Vol. 1201. P. 127184.
491. Coelho L.B., Fava E.B., Kooijman A.M., Gonzalez-Garcia Y., Olivier M.G. Molybdate as corrosion inhibitor for hot dip galvanised steel scribed to the substrate: A study based on global and localised electrochemical approaches // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 175, April. P. 108893.
492. Yuan Q., Cheng R., Zou S., Ding C., Liu H., Wang Y., Yang D., Xiao X., Jiang Q., et al. Isatin thiosemicarbazone derivatives as inhibitors against corrosion of AA6060 aluminium alloy in acidic chloride medium: Substituent

- effects // *Journal of Materials Research and Technology*. Korea Institute of Oriental Medicine. 2020. Vol. 9, No. 5. P. 11935–11947.
493. Sanni O., Ren J., Jen T.-C. Agro-industrial wastes as corrosion inhibitor for 2024-T3 aluminum alloy in hydrochloric acid medium // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 16, September. P. 100676.
 494. Tabish M., Yasin G., Anjum M.J., Malik M.U., Zhao J., Yang Q., Manzoor S., Murtaza H., Khan W.Q. Reviewing the current status of layered double hydroxide-based smart nanocontainers for corrosion inhibiting applications // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10. P. 390–421.
 495. Castro Y., Özmen E., Durán A. Integrated self-healing coating system for outstanding corrosion protection of AA2024 // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 387, February. P. 125521.
 496. Verma C., Rhee K.Y., Quraishi M.A., Ebenso E.E. Pyridine based N-heterocyclic compounds as aqueous phase corrosion inhibitors: A review // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2020. Vol. 117, No. 2. P. 265–277.
 497. Kumar A., Kumar J., Nishtha. Natural gums as corrosion inhibitor: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 64. P. 141–146.
 498. Ouakki M., Galai M., Cherkaoui M. Imidazole derivatives as efficient and potential class of corrosion inhibitors for metals and alloys in aqueous electrolytes: A review // *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 345. P. 117815.
 499. Brycki B., Szule A. Gemini surfactants as corrosion inhibitors. A review // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 344. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117686>
 500. El-Azabawy O.E., Higazy S.A., Al-Sabagh A.M., Abdel-Rahman A.A.H., Nasser N.M., Khamis E.A. Studying the temperature influence on carbon steel in sour petroleum media using facilely-designed Schiff base polymers as corrosion inhibitors // *Journal of Molecular Structure*. 2023. Vol. 1275. P. 134518.
 501. Zhang A., Wang Y., Wang H. Preparation of inorganic-polymer nano-emulsion inhibitor for corrosion resistance of steel reinforcement for concrete // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 66, March. P. 537–542. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.020>
 502. El Mazyani A., Chafi M., Essahli M. Assessment of AA5005 aluminum alloy corrosion resistance by Direct Blue 15 inhibitor in sodium chloride medium // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 37. P. 3882–3888.
 503. Verma C., Quraishi M.A., Rhee K.Y. Aqueous phase polymeric corrosion inhibitors: Recent advancements and future opportunities // *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 348. P. 118387.
 504. Shahini M.H., Ramezanzadeh B., Mohammadloo H.E. Recent advances in biopolymers/carbohydrate polymers as effective corrosion inhibitive macro-molecules: A review study from experimental and theoretical views // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 325. P. 115110.
 505. Hung H.M., Linh D.K., Chinh N.T., Duc L.M., Trung V.Q. Improvement of the corrosion protection of polypyrrole coating for CT3 mild steel with 10-camphorsulfonic acid and molybdate as inhibitor dopants // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 131, March. P. 407–416.
 506. Liu X., Wang J., Hu W. Synthesis, inhibition behavior and recycling of Fe₃O₄@ZnAl-MoO₄ LDH nanocomposite inhibitor // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 801. P. 489–501.
 507. Nguyen T.D., Nguyen A.S., Tran B.A., Vu K.O., Tran D.L., Phan T.T., Scharnagl N., Zheludkevich M.L., To T.X.H. Molybdate intercalated hydrotalcite/graphene oxide composite as corrosion inhibitor for carbon steel // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 399, July. P. 126165.
 508. Nnaji N., Nwaji N., Mack J., Nyokong T. Ball-type phthalocyanines and reduced graphene oxide nanoparticles as separate and combined corrosion inhibitors of aluminium in HCl // *Journal of Molecular Structure*. 2021. Vol. 1236. P. 130279. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130279>
 509. Padash R., Sajadi G.S., Jafari A.H., Jamalizadeh E., Rad A.S. Corrosion control of aluminum in the solutions of NaCl, HCl and NaOH using 2,6-dimethylpyridine inhibitor: Experimental and DFT insights // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 244, January. P. 122681.
 510. Wang D., Wu M., Ming J., Shi J. Inhibitive effect of sodium molybdate on corrosion behaviour of AA6061 aluminium alloy in simulated concrete pore solutions // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 270. P. 121463.
 511. Wu M., Ma H., Shi J. Beneficial and detrimental effects of molybdate as an inhibitor on reinforcing steels in saturated Ca(OH)₂ solution: Spontaneous passivation // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 116, June 2020. P. 103887.

512. Farahani M., Yousefnia H., Seyedraoufi Z.S., Shajari Y. The effect of benzotriazole gradual change on the corrosion performance of nanocomposite multilayer self-healing coating based on Titania-Alumina-Benzotriazole on AA7075 // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45, No. 13. P. 16584–16590.
513. Zheludkevich M.L., Yasakau K.A., Poznyak S.K., Ferreira M.G.S. Triazole and thiazole derivatives as corrosion inhibitors for AA2024 aluminium alloy // *Corrosion Science*. 2005. Vol. 47, No. 12. P. 3368–3383.
514. Çuğ H., Cevik E., Sun Y., Türen Y.H.A. Effect of Mg addition on thermal conductivity of Al/B4C composites // *ICENC 2016: Book of proceedings*. Sarajevo, 2016. P. 2526–2529.
515. Krishnakumar V., Xavier R.J. FT Raman and FT-IR spectral studies of 3-mercapto-1,2,4-triazole // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2004. Vol. 60, No. 3. P. 709–714.
516. Subashchandrabose S., Krishnan A.R., Saleem H., Thanikachalam V., Manikandan G., Erdogdu Y. FT-IR, FT-Raman, NMR spectral analysis and theoretical NBO, HOMO-LUMO analysis of bis(4-amino-5-mercapto-1,2,4-triazol-3-yl)ethane by ab initio HF and DFT methods // *Journal of Molecular Structure*. 2010. Vol. 981, No. 1–3. P. 59–70.
517. Sherif E.S.M., Erasmus R.M., Comins J.D. Corrosion of copper in aerated synthetic sea water solutions and its inhibition by 3-amino-1,2,4-triazole // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2007. Vol. 309, No. 2. P. 470–477.
518. Meng S., Zhao Y., Xue J., Zheng X. Environment-dependent conformation investigation of 3-amino-1,2,4-triazole (3-AT): Raman spectroscopy and density functional theory // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2018. Vol. 190. P. 478–485.
519. An S., Meng S., Xue J., Wang H., Zheng X., Zhao Y. UV-Vis, Raman spectroscopic and density functional theoretical studies on microsolvation 1, 2, 4-triazole-3-thione clusters // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021. Vol. 258. P. 119762.
520. Karavai O.V., Bastos A.C., Zheludkevich M.L., Taryba M.G., Lamaka S.V., Ferreira M.G.S. Localized electrochemical study of corrosion inhibition in microdefects on coated AZ31 magnesium alloy // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, No. 19. P. 5401–5406.
521. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D. V., Vyalii I.E., Egorkin V.S., Gnedenkov S.V. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0.5 M NaCl solution. Part 2: Coating protection // *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 11. P. 2177.
522. Finšgar M., Milošev I. Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52, No. 9. P. 2737–2749.

Список условных сокращений и обозначений

Сокращения и условные обозначения

Сокращение или условное обозначение	Значение
ω	угловая частота
2θ	двойной брэгговский угол при съемке РФА-спектра
8HQ	8-оксихинолин
β_a	тафелевский угол наклона анодного участка поляризационной кривой
β_c	тафелевский угол наклона катодного участка поляризационной кривой
$\Delta j_{\text{лок}}$	максимальная разница плотности тока между значениями в анодной и катодной области образца
ΔpH	максимальная разница значений pH в анодной и катодной областях
ΔW	скорость потери массы материала при выдержке в коррозионной среде
θ	фазовый угол
χ^2	критерий хи-квадрат (статистический критерий для проверки гипотезы)
ATMg	образец магния, полученный по аддитивной технологии
BTA	бензотриазол
CPE	constant phase element, элемент постоянного сдвига фаз
E	электродный потенциал
E_c	потенциал коррозии
$E_{\text{св}}$	энергия связи
EIS	электрохимическая импедансная спектроскопия
f	частота сигнала при снятии импедансного спектра
FumNa	фумарат натрия
GIXRD	метод рентгеновской дифрактометрии в геометрии скользящего падения, grazing incidence X-ray diffractometry
GliNa	гликолят натрия
GluNa	глюконат натрия
HA, HAP	гидроксиапатит
HBSS	Hank's balanced salt solution, сбалансированный солевой раствор Хэнкса
I	плотность тока

I_c	плотность тока коррозии
j	мнимая единица
L	индуктивность
LEV	алгоритм Левенберга–Марквардта
L_{C2}	критическая нагрузка, при которой происходит отслаивание участков покрытия, появление трещин и сколов возле края следа индентора
L_{C3}	критическая нагрузка, при которой происходит пластичное истирание покрытия до подложки
AMg3	сплав алюминия, масс. %: Mg – 3,8; Si – 0,8; Mn – 0,6; Fe – до 0,5; Ti, Cu, Zn – каждый до 0,1; Al – остальное
MA20	сплав магния, масс. %: Zn – 1,25; Ce – 0,2; Zr – 0,1; Si – 0,05; Mn – 0,04; Fe – 0,04; Cu – 0,03; Al – 0,02; Ni – 0,005; Be – 0,002; Mg – остальное
MA8	сплав магния, масс. %: Mn – 1,3–2,2; Ce – 0,15–0,35; Zn – до 0,3; Si – до 0,1; Al – до 0,1; Fe – до 0,05; Cu – до 0,05; Ni – до 0,007; Be – до 0,002; Mg – остальное
MEM	minimum essential medium или Eagle's minimum essential medium, минимальная необходимая среда, среда для культивирования клеток млекопитающих
Mg(8HQ) ₂	оксихинолилат магния
Mg–0,8Ca	кальциево-магниевый сплав, масс. %: Ca – 0,8; Mg – остальное
MRSA	метициллинрезистентный золотистый стафилококк
n	экспоненциальный коэффициент
NaOl	олеат натрия
ОСР	потенциал разомкнутой цепи, метод измерения электродного потенциала в условиях отсутствия поляризации электрода
PDP	потенциодинамическая поляризация
P_H	скорость коррозионной деградации образца согласно волюмометрическому методу
P_I	скорость коррозионной деградации образца согласно PDP-методу
P_W	скорость коррозионной деградации образца согласно гравиметрическому методу
Q	коэффициент CPE , или постоянная CPE
Q_1	коэффициент CPE , описывающий емкость внешнего слоя покрытия/пленки
Q_2	коэффициент CPE , описывающий емкость внутреннего слоя покрытия/пленки; емкость двойного электрического слоя
R	сопротивление
R_1	сопротивление внешнего слоя покрытия/пленки

R_2	сопротивление внутреннего слоя покрытия/пленки; сопротивление переносу заряда
R_P	поляризационное сопротивление
R_s	сопротивление электролита
SA	золотистый стафилококк (<i>S. aureus</i>)
Sal	салицилальдоксим
SIET	scanning ion-selective electrode technique, метод сканирующего ионоселективного электрода
SVET	scanning vibrating electrode technique, метод сканирующего вибрирующего зонда
V_H	скорость выделения водорода
V_{H_2}	объем выделившегося водорода
$Z, Z $	импеданс, модуль импеданса
Z_{CPE}	импеданс элемента <i>CPE</i>
ВЭЖХ	высокоэффективная жидкостная хроматография
ГНТ	галлуазитные нанотрубки
ГНТт	протравленные галлуазитные нанотрубки с увеличенным внутренним диаметром
ГП	гибридное покрытие – ПЭО-покрытие, импрегнированное ингибитором и полимером
ГФ-электролит	электролит, содержащий глицерофосфат кальция ($C_3H_7CaO_6P$, 25 г/л), фторид натрия (NaF , 5 г/л) и метасиликат натрия (Na_2SiO_3 , 7 г/л)
КП	композиционное покрытие – ПЭО-покрытие, импрегнированное ингибитором или полимером
КР	спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия)
КУ	контактный угол/ угол смачивания
ЛПН	метод лазерной порошковой наплавки
МДО	микродуговое оксидирование
НКЭ	насыщенный каломельный электрод
ПВДФ	поливинилиденфторид
ПКЛ	поликапролактон
ПЭО	плазменное электролитическое оксидирование, способ обработки металла
РФА	рентгенофазовый анализ
РФЭС	рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

СДГ	слоистые двойные гидроксиды
СДГ(Б)-р	порошок MgAl-СДГ, импрегнированный бензотриазолом одновременно с синтезом СДГ
СДГ-р	порошок MgAl-СДГ без ингибитора коррозии
СДГ-Б-р	порошок MgAl-СДГ, импрегнированный бензотриазолом; ВТА добавляли после синтеза СДГ
СК	стеариновая кислота
СФ-электролит	электролит, содержащий метасиликат натрия ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 15–20 г/л) и фторид натрия (NaF, 5 г/л)
СЭМ	сканирующая электронная микроскопия
УПТФЭ	ультрадисперсный политетрафторэтилен
ЭДС	энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия
ЭИ	эффективность действия ингибитора
ЭЭС	эквивалентная электрическая схема

Обозначения сформированных покрытий

Покрытие	Тип покрытия/вид обработки образца
АТМg+ГП Б-П АТМg+ГП ОН-П	импрегнирование базового ПЭО-слоя (на образце магния, полученном по аддитивной технологии) бензотриазолом (0,1 М) или олеатом натрия (0,1 М) из водного раствора и последующее нанесение слоя поликапролактона (60 г/л) из раствора на основе дихлорметана
АТМg+ГП-ГНТ-ВТА АТМg+ГП-ГНТ-Б	двукратная обработка образца АТМg с ПЭО-слоем в суспензии: 5 масс.% протравленных ГНТ с бензотриазолом + 5 масс.% поликапролактона в дихлорметане
АТМg+КП Б/ОН	обработка образца АТМg с ПЭО-слоем бензотриазолом или олеатом натрия из водного раствора (0,1 М)
АТМg+ПЭО	ПЭО-покрытие, сформированное на образце магния, полученном по аддитивной технологии
ГП	гибридное покрытие (композиционное ингибиторсодержащее покрытие + полимер) на металле или сплаве
ГП-1ИА/1ИД	однотактная обработка ПЭО-слоя раствором поликапролактона (60 г/л) и 8-оксихинолина (15 г/л) в ацетоне/дихлорметане
ГП-1СП	однотактная двукратная обработка ПЭО-слоя в растворе дихлорметана, содержащем стеариновую кислоту (0,1 М) и поликапролактон (60 г/л)
ГП-2СП	последовательная обработка ПЭО-слоя в водно-этанольном растворе стеариновой кислоты (0,1 М), а затем двукратно в растворе поликапролактона (60 г/л) в дихлорметане

ГП-8НQ+ПВДФ	импрегнация ПЭО-слоя 8-оксихинолином (3 г/л в щелочном растворе) и последующее нанесение поливинилиденфторида (6 масс.% раствор)
ГП-8НQ+УПТФЭ (1х/3х)	импрегнация ПЭО-слоя 8-оксихинолином (3 г/л в щелочном растворе) и последующее нанесение ультрадисперсного политетрафторэтилена (15% суспензия). 1х, 3х – кратность операции нанесения полимера
ГП-Б 005(П) ГП-Б 01(П)	одностадийная обработка ПЭО-слоя в растворе бензотриазола (0,05 М или 0,1 М) и поликапролактона (60 г/л) в дихлорметане
ГП-Б 005-П ГП-Б 01-П	обработка ПЭО-слоя в водном растворе бензотриазола (0,05 М или 0,1 М) и последующее нанесение слоя поликапролактона (60 г/л) из раствора на основе дихлорметана
ГП-Б-24-П	ПЭО-покрытие на сплаве алюминия, обработанное водным раствором бензотриазола (0,05 М) в течение 24 ч и последующее нанесение поливинилиденфторида (в метилпирролидоне в соотношении 1:20) методом распыления
ГП-ГНТ-ВТА ГП-ГНТ-Б	двукратная обработка образца с ПЭО-слоем в суспензии: 5 масс.% ГНТ с бензотриазолом + 5 масс.% поликапролактона в дихлорметане
ГП-ГНТ-ВТА ГП-ГНТ-Б	двукратная обработка образца с ПЭО-слоем в суспензии: 5 масс.% протравленных ГНТ с бензотриазолом + 5 масс.% раствор поликапролактона в дихлорметане
ГП-ИД	обработка ПЭО-слоя в щелочном растворе 8-оксихинолина (3 г/л) и последующее нанесение поликапролактона (60 г/л), растворенного в дихлорметане
ГП-НЦ005 ГП-НЦ01	обработка ПЭО-образца в 0,05 М или 0,1 М растворе нитрата церия и последующее нанесение слоя поликапролактона (60 г/л) из раствора на основе дихлорметана
ГП-ОН 005(П) ГП-ОН 01(П)	одностадийная обработка ПЭО-слоя в растворе олеата натрия (0,05 М или 0,1 М) и поликапролактона (60 г/л) в дихлорметане
ГП-ОН 005-П ГП-ОН 01-П	обработка ПЭО-образца в водном растворе олеата натрия (0,05 М или 0,1 М) и последующее нанесение слоя поликапролактона (60 г/л) из раствора на основе дихлорметана
ГП-Т-24-П	ПЭО-покрытие на сплаве алюминия, обработанное водным раствором 1,2,4-триазола (0,05 М) в течение 24 ч, с последующим нанесением поливинилиденфторида (в метилпирролидоне в соотношении 1:20) методом распыления
ГФ-покрытие	ПЭО-покрытие, полученное в ГФ-электролите (содержащем глице-рофосфат кальция, фторид натрия и метасиликат натрия)
КП	композиционное покрытие, импрегнация ПЭО-слоя ингибитором или полимером
КП-А/Д	композиционное покрытие без ингибитора, обработка раствором поликапролактона (30 и 60 г/л) в ацетоне или дихлорметане

КП-Б 005 КП-Б 01	ПЭО-покрытие, обработанное водным раствором бензотриазола (0,05 М или 0,1 М)
КП-Б-005/1/2/24	обработка ПЭО-образца в водном растворе бензотриазола (0,05 М) в течение 0,5, 1, 2 и 24 ч
КП-ГНТ	двукратная обработка ПЭО-образца в суспензии: 5 масс.% ГНТ без ингибитора + 5 масс.% поликапролактона в дихлорметане
КП-НЦ005/01	ПЭО-образец, обработанный в водном растворе нитрата церия (0,05 М или 0,1 М)
КП-ОН 005/01	ПЭО-образец, обработанный в водном растворе олеата натрия (0,05 М или 0,1 М)
КП-П	для магниевого сплава – двукратная обработка ПЭО-образца в растворе поликапролактона (60 г/л) в дихлорметане; для алюминиевого сплава – обработка ПЭО-образца поливинилиденфторидом (в метилпирролидоне в соотношении 1:20) методом распыления
КП-СВЭ	обработка ПЭО-образца в 0,1 М растворе стеариновой кислоты на основе деионизированной воды и этанола в соотношении 1:1
КП-СД	обработка ПЭО-образца в 0,1 М растворе стеариновой кислоты в дихлорметане
КП-СЭ	обработка ПЭО-образца в 0,1 М растворе стеариновой кислоты в этаноле
КП-Т-0,5/1/2/24	обработка ПЭО-образца из сплава алюминия в водном растворе 1,2,4-триазола (0,05 М) в течение 0,5, 1, 2 и 24 ч
ПЭО+8НQ	импрегнация ПЭО-слоя 8-оксихинолином
ПЭО+ПВДФ	нанесение поливинилиденфторида на ПЭО-слой
ПЭО+УПТФЭ (1х/3х)	нанесение ультрадисперсного политетрафторэтилена на ПЭО-слой. 1х, 3х – кратность операции нанесения полимера
ПЭО-И	обработка ПЭО-образца в щелочном растворе ингибитора 8-оксихинолина (3 г/л)
ПЭО-образец	образец с базовым ПЭО-покрытием
ПЭО-покрытие ПЭО-слой	базовое покрытие, полученное методом плазменного электролитического оксидирования в ГФ- или СФ-электролите
ПЭО-СДГ	ПЭО-покрытие, содержащее слоистые двойные гидроксиды
ПЭО-СДГ(ВТА) ПЭО-СДГ(Б)	ПЭО-покрытие, содержащее СДГ с бензотриазолом. Синтез СДГ и пропитка ингибитором осуществлялись одновременно
ПЭО-СДГ-ВТА ПЭО-СДГ-Б	ПЭО-покрытие, содержащее СДГ и обработанное бензотриазолом. Синтез СДГ и пропитка ингибитором реализуются последовательно
СФ-покрытие	ПЭО-покрытие, полученное в электролите, содержащем метасиликат и фторид натрия

Андрей Сергеевич Гнеденков



Доктор химических наук, профессор Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Института химии ДВО РАН, Владивосток, asgnedenkov@mail.ru

Автор и соавтор более 190 научных работ, в том числе 17 авторских свидетельств и патентов РФ.

Andrey S. Gnedenkov

Doctor of Chemistry, Professor of Russian Academy of Science, Principal Researcher, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, asgnedenkov@mail.ru

Author and co-author of more than 190 scientific papers, including 17 copyright certificates and patents RF

Сергей Леонидович Синебрюхов



Доктор химических наук, член-корреспондент Российской академии наук, доцент, заместитель директора, заведующий лабораторией Института химии ДВО РАН, Владивосток, sls@ich.dvo.ru

Автор и соавтор более 600 научных работ, в том числе более 60 авторских свидетельств и патентов РФ.

Sergey L. Sinebryukhov

Doctor of Chemistry, Corresponding Member of Russian Academy of Science, Associate professor, Deputy director, Head of the laboratory, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, sls@ich.dvo.ru

Author and co-author of more than 600 scientific papers, including more than 60 copyright certificates and patents RF

Валерия Станиславовна Марченко



Младший научный сотрудник Института химии ДВО РАН, Владивосток, filonina.vs@gmail.com

Автор и соавтор более 30 научных работ, в том числе 6 патентов РФ.

Valeriia S. Marchenko

Junior Researcher, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, filonina.vs@gmail.com

Author and co-author of more than 30 scientific papers, including 6 patents RF

Алексей Дмитриевич Номеровский



Аспирант, младший научный сотрудник Института химии ДВО РАН, Владивосток, nomerovskii.ad@outlook.com

Автор и соавтор более 30 научных работ, в том числе патента РФ.

Alexey D. Nomerovskii

Postgraduate student, Junior Researcher, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, nomerovskii.ad@outlook.com

Author and co-author of more than 30 scientific papers, including patent RF.

Яна Игоревна Кононенко



Младший научный сотрудник Института химии ДВО РАН, Владивосток, yana1996i@mail.ru

Автор и соавтор более 10 научных работ, в том числе патента РФ.

Yana I. Kononenko

Junior Researcher, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, yana1996i@mail.ru

Author and co-author of more than 10 scientific papers, including patent RF

Валентин Иванович Сергиенко



Доктор химических наук, академик Российской академии наук, профессор, советник РАН, советник председателя ДВО РАН, научный руководитель ИХ ДВО РАН, заведующий отделом Института химии ДВО РАН, Владивосток, sergienkovi@yandex.ru

Автор и соавтор более 400 научных работ, в том числе более 20 авторских свидетельств и патентов РФ.

Valentin I. Sergienko

Doctor of Chemistry, Academician of Russian Academy of Science, Professor, Advisor to the RAS, Advisor to the Chairman of the Far Eastern Branch of the RAS, Scientific Director, Head of the department, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, sergienkovi@yandex.ru

Author and co-author of more than 400 scientific papers, including more than 20 copyright certificates and patents RF.

Сергей Васильевич Гнеденков



Доктор химических наук, член-корреспондент Российской академии наук, профессор, директор, заведующий отделом Института химии ДВО РАН, Владивосток, svg21@hotmail.com

Автор и соавтор более 700 научных работ, в том числе более 70 авторских свидетельств и патентов РФ.

Sergey V. Gnedenkov

Doctor of Chemistry, Corresponding Member of Russian Academy of Science, Professor, Director, Head of the department, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, svg21@hotmail.com

Author and co-author of more than 700 scientific papers, including more than 60 copyright certificates and patents RF.

Научное издание

Гнеденков Андрей Сергеевич
Синебрюхов Сергей Леонидович
Марченко Валерия Станиславовна
Номеровский Алексей Дмитриевич
Кононенко Яна Игоревна
Сергиенко Валентин Иванович
Гнеденков Сергей Васильевич

**Самозалечивающиеся покрытия
для защиты функциональных материалов от коррозии:
стратегии формирования, механизм действия**

Отпечатано с оригинал-макета,
выполненного в Институте химии ДВО РАН,
минуя редподготовку в издательстве

Дизайн Н.И. Семячкина
Редактор Г.Ф. Низяева
Оператор верстки Т.Л. Пинчук

Подписано в печать 14.03.2025
Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 22,3. Уч.-изд. л. 28,5.
Тираж 600 экз. Заказ № Т-717.

Институт химии ДВО РАН
690022 г. Владивосток, проспект 100 лет Владивостоку, 159

АО «Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА»

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного электронного оригинал-макета в типографии

АО «Т 8 Издательские Технологии»
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42