

Обзорная статья

УДК 620.197.2+544.653+546.46

DOI: 10.31857/S0869769824060046

EDN: HSYLPH

Гибридные покрытия с эффектом самозалечивания на поверхности функциональных материалов

А. С. Гнеденков[✉], С. Л. Синебрюхов, В. С. Марченко,
А. Д. Номеровский, Я. И. Кононенко, В. И. Сергиенко, С. В. Гнеденков

Гнеденков Андрей Сергеевич

профессор РАН, доктор химических наук

главный научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

asg17@mail.com

<http://orcid.org/0000-0002-9822-7849>

Синебрюхов Сергей Леонидович

член-корреспондент РАН, доктор химических наук, доцент

заместитель директора

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

sls@ich.dvo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

Марченко Валерия Станиславовна

младший научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

filonina.vs@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-9544-3597>

Номеровский Алексей Дмитриевич

младший научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

nomerovskii.ad@outlook.com

<http://orcid.org/0000-0002-3118-5971>

Кононенко Яна Игоревна

младший научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

yana1996i@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2299-9009>

Сергиенко Валентин Иванович

академик РАН, доктор химических наук, профессор

научный руководитель организации

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

referent@ich.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0547-5545>

Гнеденков Сергей Васильевич
член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор
директор
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
svg21@hotmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Аннотация. В статье представлен обзор достижений в области создания самовосстанавливающихся гибридных покрытий, используемых для защиты функциональных материалов при их эксплуатации в коррозионно-активных средах. Самовосстанавливающиеся (самозалечивающиеся) покрытия вызывают большой интерес благодаря их способности подавлять коррозию, которая является серьезной проблемой практически во всех отраслях промышленности. Разработка таких smart-покрытий, обладающих функцией активной антикоррозионной защиты и самовосстановления, необходима для долговременной работы металлических конструкций в агрессивных химических средах. При повреждении самовосстанавливающегося покрытия в коррозионной среде происходит формирование нового защитного слоя на поверхности дефекта и функциональные характеристики изделия восстанавливаются. Автономные механизмы восстановления защитных свойств антикоррозионных слоев реализуются благодаря внедрению ингибиторов коррозии в матрицу покрытия.

Ключевые слова: коррозионный процесс, самозалечивающиеся покрытия, ингибитор коррозии, плазменное электролитическое окисление

Для цитирования: Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Марченко В.С., Номеровский А.Д., Кононенко Я.И., Сергиенко В.И., Гнеденков С.В. Гибридные покрытия с эффектом самозалечивания на поверхности функциональных материалов // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 6. С.41-55.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060046>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН (проект № FWFN(0205)-2024-0001).

Review article

Hybrid coatings with a self-healing effect on the surface of functional materials

A. S. Gnedenkov, S. L. Sinebryukhov, V. S. Marchenko, A. D. Nomerovskii, Y. I. Kononenko, V. I. Sergienko, S. V. Gnedenkov

Andrey S. Gnedenkov
Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences (Chemistry)
Chief Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
asg17@mail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9822-7849>

Sergey L. Sinebryukhov
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences (Chemistry),
Associate Professor
Deputy Director
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
sls@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

Valeriia S. Marchenko
Junior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
filonina.vs@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9544-3597>

Aleksei D. Nomerovskii
Junior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
nomerovskii.ad@outlook.com
<http://orcid.org/0000-0002-3118-5971>

Yana I. Kononenko
Junior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
yana1996i@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2299-9009>

Valentin I. Sergienko
Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences (Chemistry), Professor
Scientific leader of the organization
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
referent@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0547-5545>

Sergey V. Gnedenkov
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences (Chemistry),
Professor
Director
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
svg21@hotmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Abstract. This article provides a review of advances in self-healing hybrid coatings development used to protect functional materials in corrosive environments. Self-healing coatings are currently attracting much interest due to their ability to suppress corrosion, which is a serious problem in almost all industries. The design of smart coatings with the active anticorrosion protection and self-healing is necessary for the long-term service life of metal structures in aggressive environments. When a self-healing coating is damaged in a corrosive media a new protective layer is formed on the surface of the defect and the functional characteristics of the product are restored. Autonomous mechanisms for restoring the protective properties of anticorrosion layers activated due to introducing corrosion inhibitors into the coating matrix.

Keywords: corrosion process, self-healing coatings, corrosion inhibitor, plasma electrolytic oxidation

For citation: Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Marchenko V.S., Nomerovskii A.D., Kononenko Y.I., Sergienko V.I., Gnedenkov S.V. Hybrid coatings with a self-healing effect on the surface of functional materials. Vestnik of the FEB RAS. 2024;(6):41-55. (In Russ.)
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060046>

Funding. This work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (project no. FWFN(0205)-2024-0001).

Серьезной проблемой для различных отраслей промышленности, где металлы и сплавы выступают в роли конструкционных и функциональных материалов, является коррозия [1]. Это одна из основных причин энергетических и материальных затрат, возникающих в течение срока службы многих деталей и устройств в различных сферах промышленного использования. Глобальная годовая стоимость экономических потерь от разрушения материалов в результате коррозии может достигать триллионов долларов. Чтобы снизить сумму ущерба от коррозионной деструкции металлов, необходимо разработать такие технологии их антикоррозионной защиты, которые позволят не только повысить эксплуатационные характеристики обрабатываемого изделия, но и расширить область практического применения материалов.

В настоящее время существуют различные способы, снижающие интенсивность процесса коррозии металлов и сплавов. Например, формирование защитных покрытий [2, 3], обработка ингибиторами коррозии [4]. Для антикоррозионной защиты применяют различные типы гибридных покрытий [2, 5, 6] (формируемые в том числе с использованием неорганических соединений [2] и органических полимеров [7]), гидрофобные покрытия [6] и покрытия с оксидами редкоземельных элементов [8]. Некоторые из ранее существовавших типов защитных слоев, таких как хроматные покрытия [9], в настоящее время ограничены для использования. Учитывая значительное влияние деятельности человека на окружающую среду в настоящее время, крайне важно использовать экологически чистые вещества и покрытия, которые будут эффективно защищать материал, не нанося даже минимального вреда окружающей среде.

Для защиты вентильных металлов, к которым относятся магний, алюминий и титан, может быть использован метод плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) [10]. Формирование покрытия происходит в водном растворе электролита при высоких значениях напряжения, вызывающих протекание плазменных микроархивов на поверхности обрабатываемого материала [3]. Получаемые слои не являются токсичными, обладают высокой химической стойкостью и снижают доступ среды к защищаемому материалу. Методом электрохимической импедансной спектроскопии было установлено, что в результате формирования ПЭО-покрытия уровень антикоррозионной защиты увеличивался на несколько порядков в сравнении с образцом из сплава без покрытия [11]. В процессе формирования покрытий методом ПЭО в составе защитного слоя могут быть сформированы различные фазы (включая биосовместимые вещества, такие как гидроксиапатит [3]) за счет плазмохимического синтеза при взаимодействии компонентов электролита и обрабатываемой подложки материала. Несмотря на антикоррозионные свойства ПЭО-покрытий, высокая пористость внешнего слоя снижает защитные свойства покрытия в целом, обеспечивая постепенное проникновение агрессивной среды к металлической поверхности, что, в конечном итоге, приводит к образованию питтингов и деструкции материала. Поэтому пористую часть защитного слоя необходимо функционализировать с целью улучшения необходимых, в том числе изоляционных, характеристик.

ПЭО-покрытие имеет развитую поверхность, а также большое количество пор различного размера в поверхностном слое, которые могут служить резервуаром для наполнения различными функциональными веществами, например ингибиторами коррозии или биоактивными и бионертными соединениями [12]. Установлено, что заполнение пористой части ПЭО-слоя полимерным материалом позволяет формировать гибридные покрытия с высокими антикоррозионными и антифрикционными свойствами [10]. В работе [13] авторы обрабатывали ПЭО-слой, сформированный на магниевом сплаве, фторполимерным материалом для снижения скорости деградации материала. В другой работе [14] авторы сформировали на магниевом сплаве гибридное ПЭО-покрытие с включением многостенных углеродных нанотрубок и поликапролактона. Был зафиксирован рост коррозионной защиты, улучшение механических характеристик сплава.

Однако такие слои обеспечивают только «пассивную» защиту материала, и, в случае нарушения их целостности, коррозионный процесс будет протекать под покрытием, постепенно разрушая подложку, что в конечном итоге приведет к деструкции обработанного изделия. Избежать этого позволяют покрытия с функцией активной коррозионной защиты. При формировании дефекта на поверхности такого покрытия образуется дополнительный барьерный (защитный) слой в области повреждения, препятствующий дальнейшему развитию коррозии. Подобные антикоррозионные покрытия в мировой научной практике получили название «самозалечивающихся», или самовосстанавливающихся (self-healingcoatings) [6, 15].

Необходимой составляющей таких smart-покрытий является действующее активное вещество, подавляющее разрушение сплава, – ингибитор коррозии. Ингибиторы используются для защиты от коррозии металлов в различных отраслях, таких как транспорт, энергетика и химическая промышленность. Действие ингибиторов коррозии в водной среде обусловлено физической адсорбцией вещества на поверхности защищаемой подложки и последующим химическим взаимодействием с металлом, оксидным слоем или продуктами коррозии с образованием малорастворимых соединений, предотвращающих дальнейшее развитие коррозии [16].

Следует отметить, что выбор эффективных ингибиторов коррозии для защиты сплавов магния и алюминия представляет довольно трудоемкую задачу, что связано с высокой реакционной способностью магния в водной среде, а также алюминия в хлоридсодержащих средах [17]. Например, в работе [18] тестировали более 150 различных веществ (включая органические и неорганические соединения) в качестве потенциальных ингибиторов коррозии для различных сплавов магния в 0,5 масс.% растворе NaCl. Ингибирующее действие оказали только 15 веществ, из которых более 60% были квалифицированы как экологически вредные, канцерогенные или токсичные.

Следует отметить, что использование эффективных и нетоксичных ингибиторов коррозии является одним из самых простых и практичных методов повышения коррозионной стойкости сплавов [19].

В области разработки способов антикоррозионной защиты проводится тестирование различных ингибиторов [20, 21]. Среди неорганических ингибиторов для сплавов магния используются фосфаты [22], ванадаты [23], молибдаты [24], нитраты [25], хроматы [26] и соли редкоземельных элементов, например соли церия [27].

Органические соединения, такие как аминокислоты, спирты и амины, являются потенциальными ингибиторами коррозии магниевых сплавов. Некоторые из них продемонстрировали защитный эффект, в том числе 8-оксихинолин (8HQ) [28], бензотриазол (БТА) [7] и додецилсульфат натрия [29]. Среди органических соединений, которые могут быть перспективными ингибиторами коррозии магния в водных средах, следует особо выделить основания Шиффа, широко используемые в настоящее время в медицине благодаря своей хорошей биологической активности [30, 31].

Бесспорно, что разработка прорывных методов и новых технологий формирования покрытий с функцией self-healing будет способствовать развитию сферы защиты материалов от коррозионной деградации, вызванной агрессивным действием различных сред: воздуха, атмосферных осадков, морской воды различной солености, жидкостей организма человека (для имплантационных материалов). Дополнительное введение в состав ПЭО-слоя наноконтейнеров (например, галлузитных нанотрубок – ГНТ), заполненных ингибитором коррозии, дает возможность формировать помимо вышеуказанных преимуществ активную антикоррозионную защиту [32]. В настоящее время ведутся работы, направленные на формирование и изучение свойств защитных слоев с функцией самовосстановления, комбинирование ингибиторов коррозии, добавление их в состав ПЭО-покрытий; разрабатываются новые тесты и методики проверки эффективности этих ингибиторов коррозии; проводятся исследования, нацеленные на определение механизма защиты и самовосстановления покрытий, импрегнированных ингибиторами [33–39]. Разрабатываются альтернативные способы внедрения в состав покрытия активных компонентов, способствующих подавлению коррозионного процесса, устанавливается эффективность действия ингибиторов коррозии (рис. 1) [40]. Покрытия, сформированные методом ПЭО, благодаря особенностям строения способны служить базой для создания различного типа функциональных гибридных слоев, включающих в свой состав в том числе материалоспецифические ингибиторы коррозии [41].

Подход, лежащий в основе создания самозалечивающихся покрытий, заключается в том, что такие защитные слои должны не только служить барьером от внешнего воздействия, но и реагировать на изменения в собственной внутренней структуре, сочетая механизмы защиты от повреждений и восстановления целостности покрытия. В настоящее время изучены принципы действия многих ингибиторов, и каждый имеет определенные недостатки. Некоторые из них можно минимизировать путем внедрения ингибитора коррозии в структуру, играющую роль контейнера, т.е. путем капсулирования ингибитора. По этой причине разрабатываются самовосстанавливающиеся покрытия, содержащие в своем составе наноконтейнеры, наполненные ингибитором коррозии (рис. 2) [42]. В процессе механического и/или коррозионного повреждения покрытия происходит активация сформированного наноконтейнера под воздействием изменения состава внешней среды и высвобождение ингибитора, который взаимодействует с незащищенным участком поверхности с образованием защитного слоя, тем самым продлевается срок службы материала (рис. 3). Однако использование наноконтейнеров зачастую ограничивается их низкой совместимостью с матрицей покрытия.

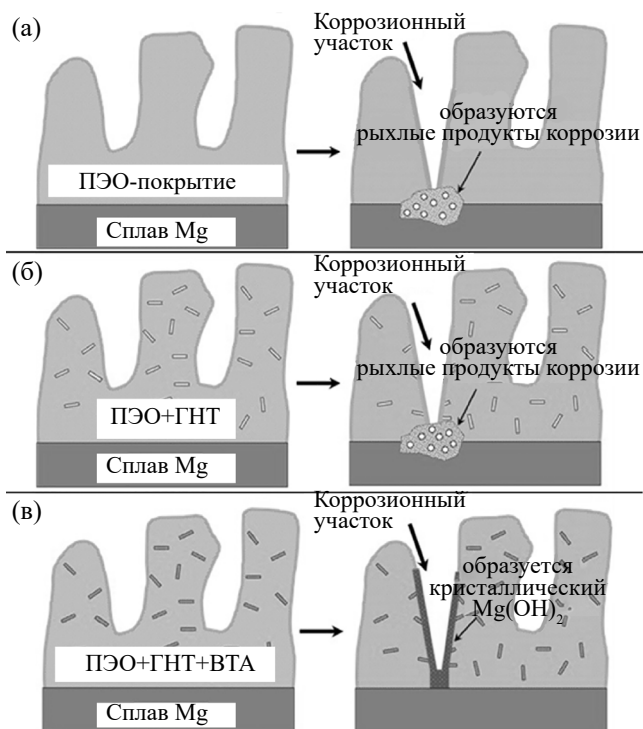


Рис. 1. Механизм коррозионной деградации и защитного действия покрытий на сплаве магния AM50 в растворе NaCl: (а) базовое ПЭО-покрытие, (б) ПЭО+ГНТ – ПЭО + галлуазитные нанотрубки, (в) ПЭО+ГНТ+ВТА – ПЭО + галлуазитные нанотрубки + бензотриазол[40]

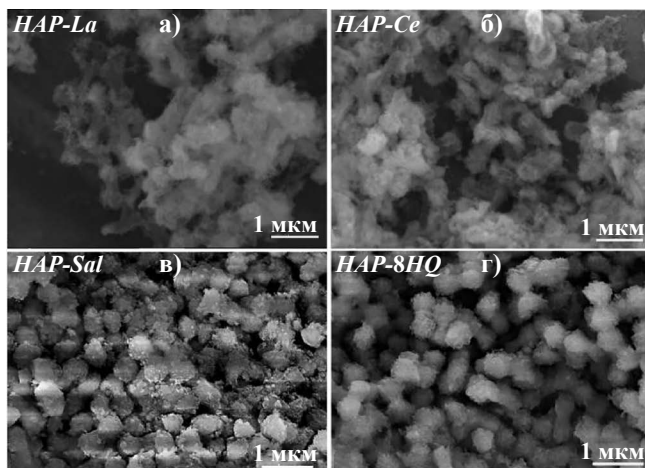


Рис. 2. СЭМ-изображения микрочастиц гидроксиапатита (HAP), обработанных ингибиторами: (а) La^{3+} , (б) Ce^{3+} , (в) салицилальдоксим (Sal), (г) 8-оксихинолин (8HQ) [42]

На основе анализа литературных данных можно выделить два основных механизма самовосстановления защитных слоев в случае протекания коррозионного процесса: 1) восстановление за счет формирования защитных слоев из продуктов коррозии, которые блокируют доступ агрессивных компонентов среды к активным центрам, 2) восстановление за счет формирования защитных слоев в результате присутствия в составе покрытия органических или неорганических ингибиторов коррозии, часто нагруженных

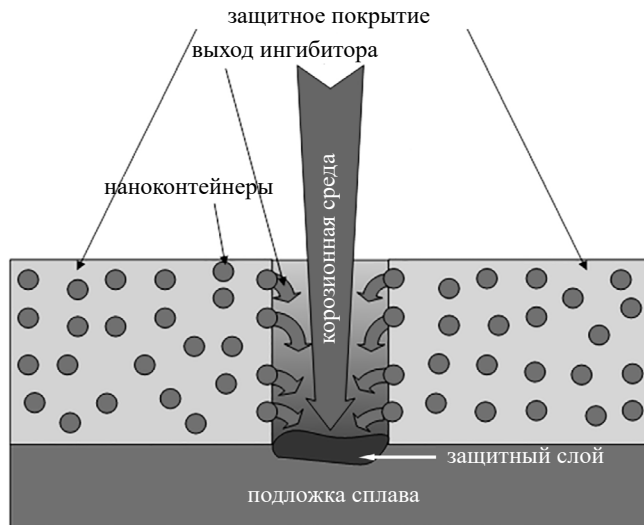


Рис. 3. Схема подавления коррозионного процесса за счет действия ингибитора, находящегося в составе защитного покрытия [43]

в «умные» контейнеры и вступающих в химическую реакцию с компонентами окружающей среды [44].

Следует отметить, что поры ПЭО-покрытия отвечают требованиям, предъявляемым к резервуарам для введения в них ингибиторов коррозии. Для таких пор характерны: а) химическая и механическая стабильность, б) совместимость с матрицей покрытия, в) достаточная вместимость, г) сохранность ингибитора, д) способность высвобождать ингибитор при возникновении коррозионного процесса [42].

В настоящее время активно разрабатываются самозалечивающиеся покрытия для защиты магниевых и алюминиевых сплавов и повышения их коррозионной стойкости [33, 34, 36, 37, 39]. При формировании таких покрытий используются химические вещества, способные снизить коррозионную активность материала, – хелатирующие агенты. Среди них наиболее известен упомянутый ранее 8-оксихинолин (8HQ) [42]. Процесс коррозии магниевых и алюминиевых сплавов приводит к изменению pH среды, что способствует образованию малорастворимых комплексов 8HQ с Mg в диапазоне pH 9,4–12,7 и с Al при pH 4,2–9,8 [34]. В работе [34] изучали ингибирующее действие 8HQ на коррозию магниевого сплава AZ31 (масс. %: Mg – 95,546; Al – 3,0; Zn – 1,0; Mn – 0,43; Si – 0,01; Cu – 0,01; Ni – 0,001; Fe – 0,003). В публикациях [35] установлено, что 8HQ образует комплексные хелатные соединения, такие как $\text{Cu}(8\text{HQ})_2$, $\text{Al}(8\text{HQ})_3$, на поверхности металлов, играя важную роль в ингибировании коррозии. Действие ингибитора связано также с химической адсорбцией молекул 8HQ на поверхности, образуемый слой предотвращает доступ агрессивных ионов Cl^- и OH^- к металлу.

Результаты работ различных научных коллективов свидетельствуют о возможности использования в качестве контейнеров для загрузки ингибитора слоистых двойных гидроксидов (СДГ). Например, в работе [45] представлен процесс импрегнирования 8-оксихинолином покрытий из слоистых двойных гидроксидов магния и алюминия, предварительно сформированных на сплаве магния AZ31. Полученные покрытия даже после 30 сут выдержки в 3,5% растворе NaCl показали более высокую коррозионную стойкость по сравнению с покрытиями, не содержащими ингибитор. Авторы статьи [46] формировали СДГ на поверхности и в пористой части предварительно полученного ПЭО-покрытия и загружали их ингибитором коррозии (бензотриазолом, ВТА). Детальный анализ антикоррозионных свойств материала с таким покрытием показал высокую эффективность защиты обрабатываемого магниевого сплава и установил механизм самозалечивания, заключающийся в формировании комплекса $\text{Mg}(\text{BTA-H})_2(\text{BTA-H} - \text{бен-$

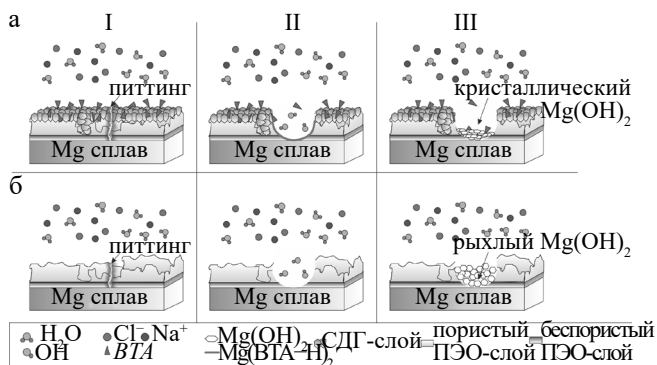


Рис. 4. Механизм коррозионной деградации магниевого сплава с ПЭО-СДГ(ВТА)-покрытием (а) и базовым ПЭО-покрытием (б). I – в покрытии возникает дефект (а, б); II – инициация коррозионного процесса, приводящая к растворению магниевой матрицы (а, б); диффузия ВТА в дефектную зону с возможным образованием $Mg(BTA-N)_2$ (а); III – молекулы ВТА и слой $Mg(BTA-N)_2$ ингибируют процесс коррозии, в результате чего образуется кристаллический $Mg(OH)_2$ (а); рыхлые продукты $Mg(OH)_2$ образуются в зоне дефекта базового ПЭО-покрытия (б) [46]

зотриазолат-анион) (рис. 4). В работе [47] также были сформированы на ПЭО-покрытии СДГ и импрегнированы салицилат-ионом. Установлены высокие антикоррозионные характеристики полученного гибридного слоя, а также антибактериальное действие против золотистого стафилококка.

Было обнаружено положительное влияние 8HQ на коррозионную активность сплава AZ31 путем создания гибридного золь-гель-покрытия с внедрением в его состав ингибитора коррозии [34]. Высокая эффективность ингибитора была зафиксирована для гибридных ПЭО-покрытий, импрегнированных 8HQ [12]. Данный эффект обуславливается формированием малорастворимого устойчивого комплексного соединения $Mg(8HQ)_2$, блокирующего протекание коррозионного процесса в областях микродефектов и микропор в ПЭО-слое (рис. 5).

Проведенный в работе [48] сравнительный анализ строения, состава и свойств ПЭО-слоев, сформированных на магниевом сплаве AZ31 в щелочно-силикатном электролите без добавления и с добавлением наночастиц ZrO_2 с последующей выдержкой покрытий в 0,05 М растворе 8-оксихинолина в течение 72 ч, показал, что на поверхности ПЭО-покрытия, полученного в электролите без добавления наночастиц, образуются цветковидные структуры 8-оксихинолината магния ($Mg(8HQ)_2$). В результате формирования таких структур существенно улучшается коррозионная стойкость сплава. На образцах с ПЭО-слоем, полученным в ZrO_2 -содержащем электролите, подобные соединения отсутствуют. Это объясняется тем, что в результате внедрения наночастиц в покрытие блокируются поры ПЭО-покрытия, предотвращая реакцию ионов магния с $C_9H_6NO^-$.

В работе [49] исследованы поверхностные слои, полученные на сплаве магния AZ31 методом плазменного электролитического оксидирования с последующей обработкой поверхностного слоя 8-оксихинолином. Образцы с ПЭО-покрытием погружали при 298 К в 0,05 М и 0,1 М раствор 8-оксихинолина в этаноле и выдерживали в этой среде в течение 1 и 2 сут. Оказалось, что с увеличением концентрации 8HQ и времени выдержки существенно увеличивалась электрохимическая стабильность полученных поверхностных слоев, что вызвано повышением уровня защитных свойств за счет химического взаимодействия. Авторы [49] предполагают, что слой $Mg(8HQ)_2$, сформированный на неорганической поверхности, может быть использован в биосенсорах, биоаналитических устройствах, в промышленном катализе. 8-оксихинолинат магния также обладает антиоксидантным действием, что может способствовать применению материала с таким покрытием в медицине.

Целью исследования [50] было определение электрохимических и фотокаталитических свойств поверхностных слоев, полученных плазменным оксидированием в электролитах

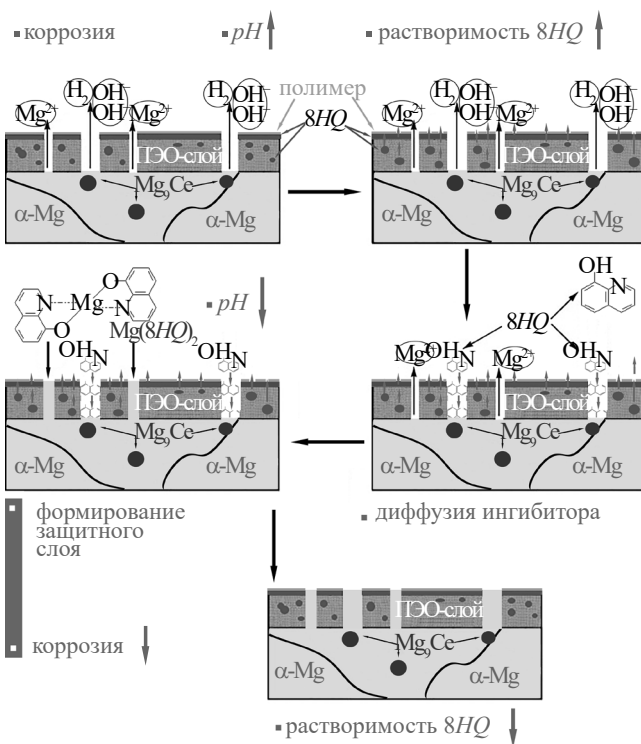


Рис. 5. Механизм активной защиты от коррозии магниевого сплава МА8 с покрытием, содержащим полимер и ингибитор, в момент разрушения защитного слоя [12]

с добавлением наночастиц TiO_2 и SnO_2 и подвергнутых последующей обработке в растворах ингибиторов коррозии. Постобработка представляла собой выдержку образцов в течение 1 сут при 298 К в растворах различных ингибиторов в этаноле: 0,05 М 8HQ; 0,05 М 8HQ/0,01 М 2-аминопиридина; 0,05 М 8HQ/0,01 М 2-аминофенола. В результате обнаружено, что введение ингибирующих агентов способствует повышению фотокаталитической и снижению электрохимической активности полученных покрытий.

Для создания нового гибридного антикоррозионного защитного покрытия на поверхности сплава магния ZK30 в работе [36] добавляли Ce^{3+} и 8HQ в пористую оксидную золь-гель-пленку. Эффективность коррозионной защиты подтверждена методами локальной электрохимической импедансной спектроскопии и сканирующего вибрирующего зонда. Было установлено, что в результате постепенного проникновения коррозионного раствора через микродефекты на поверхности покрытия образуются MgO и $\text{Mg}(\text{OH})_2$, частично блокирующие поры и предотвращающие прохождение коррозионно-активной среды через тонкий барьерный слой. Данный эффект усиливается присутствием ионов церия благодаря дополнительному формированию стабильного и малорастворимого гидроксида церия.

Ингибирующее воздействие додецилбензенсульфоната и 8HQ на коррозионное поведение магниевого сплава AZ91D в коррозионно-активном растворе было исследовано методами электрохимической импедансной спектроскопии и потенциодинамической поляризации [37]. Доказано, что 8HQ эффективно защищает магниевый сплав от коррозии, тогда как для додецилбензенсульфоната зафиксированный ингибирующий эффект был не столь значителен.

Установлено уменьшение скорости коррозии магниевого сплава GW103, содержащего редкоземельные элементы (масс. %: Y – 10,4; Gd – 3,3; Zr – 0,46), при использовании ингибиторов коррозии, включающих алифатические и ароматические карбоксилаты и неорганические соли [38].

В работе [39] исследовали влияние 8НҚ на свойства анодных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования (МДО, аналог ПЭО) на поверхности магниевого сплава AZ91. Добавляя 8НҚ в состав электролита для МДО, наблюдали увеличение коррозионного сопротивления покрытий методом потенциодинамической поляризации. Авторами установлено, что 8НҚ участвует в формировании покрытия и изменяет его цвет.

Для антикоррозионной защиты алюминия в работе [33] использовался новый способ формирования в полиэлектролитных растворах наноструктурированного покрытия, включающего ингибитор коррозии 8НҚ и наночастицы диоксида титана. При облучении ультрафиолетом, в результате которого происходит перераспределение электронной плотности TiO_2 , поврежденная область самозалечивается с образованием хелатного комплекса. Данный метод подходит для создания покрытий, работающих по типу self-healing, и на поверхности магниевых сплавов.

Таким образом, разработка способов создания покрытий, обладающих свойствами самозалечивания (самовосстановления) после коррозионного и/или механического повреждения, является современным перспективным направлением в сфере защиты материалов от коррозионного разрушения. Один из возможных механизмов реализации таких свойств защитных слоев заключается в активации ингибитора коррозии, находящегося в составе покрытия, за счет изменения pH в результате протекания коррозионных процессов и последующем подавлении интенсивной деградации материала. Создание слоя, надежно защищающего материал от коррозионной деградации, с учетом уникальных функциональных свойств сплавов магния и алюминия (высокие прочностные характеристики и низкий удельный вес), может существенным образом расширить спектр их использования в различных отраслях промышленности. Стоит отметить, что в литературе мало исследований, направленных на создание гибридных самозалечивающихся защитных слоев с использованием метода плазменного электролитического оксидирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Физико-химические основы локальной гетерогенной коррозии магниевых и алюминиевых сплавов. Физико-химические основы локальной гетерогенной коррозии магниевых и алюминиевых сплавов / А.С. Гнеденков, С.Л. Синебрюхов, В.С. Филонина, В.И. Сергиенко, С.В. Гнеденков. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. 424 с.
2. 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. 2020. Vol. 5 (13). P. 7262–7270.
3. 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. 2021. Vol. 11(12). P. 4468–4484.
4. 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(9). P. 6843–6852.
5. 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(4). P. 1285–1296.
6. Wang X., Jing C., Chen Y., Wang X., Zhao G., Zhang X. 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(1). P. 291–300.
7. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Ustinov A.Y., Sukhoverkhov S.V., Gnedenkov S.V. New polycaprolactone-containing self-healing coating design for enhance corrosion resistance of the magnesium and its alloys // Polymers. 2023. Vol. 15(1). P. 202.
8. Das A.K. Effect of rare earth oxide additive in coating deposited by laser cladding: A review // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 52. P. 1558–1564.
9. 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.

10. 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(6). P. 2538.
11. Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R., Babaei K. Effect of particles addition to solution of plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of PEO coatings formed on magnesium and its alloys: A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8 (3). P. 799–818.
12. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Plekhova N.G., Gnedenkov S.V. Smart composite antibacterial coatings with active corrosion protection of magnesium alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10(12). P. 3589–3611.
13. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Imshinetskiy I.M. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 182. P. 109254.
14. Daavari M., Conde A., Atapour M., HosseinpourRokni M., Mora Sánchez H., Mohedano M. In vitro corrosion-assisted cracking of AZ31B Mg alloy with a hybrid PEO+MWCNTs/PCL coating // *Surfaces and Interfaces*. 2023. Vol. 42. P. 103446.
15. 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(5). P. 1618–1628.
16. 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.
17. 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.
18. Lamaka S.V., Vaghefnazari 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.
19. Al-Amieri A.A., Isahak W.N.R.W., Al-Azzawi W.K. Corrosion inhibitors: Natural and synthetic organic inhibitors // *Lubricants*. 2023. Vol. 11(4). P. 174.
20. 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. 11 (2). P. 641–656.
21. 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(1). P. 202–215.
22. Williams G., McMurray H.N., Grace R. Inhibition of magnesium localised corrosion in chloride containing electrolyte // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55(27). P. 7824–7833.
23. 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(2). P. C94–C102.
24. Kharitonov D.S., Zimowska M., Ryl J., Zieliński A., Osipenko M.A., Adamiec J., et al. Aqueous molybdate provides effective corrosion inhibition of WE43 magnesium alloy in sodium chloride solutions // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 190. P. 109664.
25. Cui Z., Ge F., Lin Y., Wang L., Lei L., Tian H., et al. Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in the chloride solution containing ammonium nitrate // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 278. P. 421–437.
26. Williams G., Grace R., Woods R.M. Inhibition of the localized corrosion of Mg alloy AZ31 in chloride containing electrolyte // *Corrosion*. 2015. Vol. 71(2). P. 184–198.
27. 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 (4). P. 739–747.
28. 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 (8). P. 2254–2265.
29. Song H., Xu Z., Benabou L., Yin Z., Guan H., Yan H., et al. 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 (1). P. 287–300.
30. 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.
31. Ali A., Pervaiz M., Saeed Z., Younas U., Bashir R., Ullah 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.

32. 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.
33. 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.
34. 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 (9–10). P. 1479–1486.
35. 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 (11). P. 1915–1926.
36. Lamaka S.V., Knörnschild 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 (1). P. 131–141.
37. 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 (5). P. 1603–1609.
38. 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 (27). P. 10166–10178.
39. Zhang R.F., Zhang S.F., Yang N., Yao L.J., He F.X., Zhou Y.P., et al. 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.
40. 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.
41. 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 (14). P. 3035.
42. Snihirova D., Lamaka S.V., Taryba M., Salak A.N., Kallip S., Zheludkevich M.L., et al. Hydroxyapatite microparticles as feedback-active reservoirs of corrosion inhibitors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2 (11).P. 3011–3022.
43. Zheludkevich M. Self-healing anticorrosion coatings // *Self-healing materials: Fundamentals, design strategies, and applications*. Weinheim, Germany: John Wiley and Sons, 2009. P. 101–139.
44. Taryba M., Lamaka S.V., Snihirova D., Ferreira M.G.S., Montemor M.F., Wijting W.K., et al. 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 (12). P. 4475–4488.
45. 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.
46. 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 (10). P. 3688–3709.
47. Lv Y., Zhang Y., Meng X., Dong Z., Zhang X. Construction of a PEO/Mg–Mn LDH composite coating on Mg–Ag–Mn alloy for enhanced corrosion resistance and antibacterial potential // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49 (22). P. 35632–35643.
48. 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.
49. 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.
50. 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.

REFERENCES

1. 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.).

2. 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*. 2020;5(13):7262–7270. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04060>.
3. 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 Alloy*. 2021;11(12):4468–4484.
4. 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;4(9):6843–6852. <https://doi.org/10.1021/acsaabm.1c00560>
5. 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;9(4):1285–1296.
6. Wang X., Jing C., Chen Y., Wang X., Zhao G., Zhang X. 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;8(1):291–300. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.11.011>
7. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Ustinov A.Y., Sukhoverkhov S.V., Gnedenkov S.V. New polycaprolactone-containing self-healing coating design for enhance corrosion resistance of the magnesium and its alloys. *Polymers*. 2023;15(1):202.
8. Das A.K. Effect of rare earth oxide additive in coating deposited by laser cladding: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022;52:1558–1564.
9. 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;21:100857.
10. 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;28(6):2538.
11. Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R., Babaei K. Effect of particles addition to solution of plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of PEO coatings formed on magnesium and its alloys: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020;8(3):799–818.
12. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Plekhova N.G., Gnedenkov S.V. Smart composite antibacterial coatings with active corrosion protection of magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022;10(12):3589–611.
13. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Imshinetskiy I.M. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings. *Corrosion Science*. 2021;182:109254.
14. Daavari M., Conde A., Atapour M., Hosseinpour Rokni M., Mora Sánchez H., Mohedano M. In vitro corrosion-assisted cracking of AZ31B Mg alloy with a hybrid PEO+MWCNTs/PCL coating. *Surfaces and Interfaces*. 2023;42:103446.
15. 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;11(5):1618–1628.
16. 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;20:2060–2093.
17. Guo X.-P., Song G.-L., Hu J.-Y., Huang D.-B. Corrosion inhibition of magnesium (Mg) alloys. In: *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*. 2013; p. 61–84.
18. Lamaka S.V., Vaghefnazari B., Mei D., Petrauskas R.P., Höche D., Zheludkevich M.L. Comprehensive screening of Mg corrosion inhibitors. *Corrosion Science*. 2017; 128:224–240.
19. Al-Amiery A.A., Isahak W.N.R.W., Al-Azzawi W.K. Corrosion inhibitors: Natural and synthetic organic inhibitors. *Lubricants*. 2023;11(4):174.
20. Jamshidipour Z., Toorani M., Aliofkhaezrai 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;11(2):641–656.
21. 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;9(1):202–215.

22. Williams G, McMurray HN, Grace R. Inhibition of magnesium localised corrosion in chloride containing electrolyte. *Electrochimica Acta*. 2010;55(27):7824–7833.
23. Feng Z., Hurley B., Li J., Buchheit R. Corrosion inhibition study of aqueous vanadate on Mg alloy AZ31. *Journal of the Electrochemical Society*. 2018;165(2):C94–C102.
24. Kharitonov D.S., Zimowska M., Ryl J., Zieliński A., Osipenko M.A., Adamiec J., et al. Aqueous molybdate provides effective corrosion inhibition of WE43 magnesium alloy in sodium chloride solutions. *Corrosion Science*. 2021;190:109664.
25. Cui Z., Ge F., Lin Y., Wang L., Lei L., Tian H., et al. Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in the chloride solution containing ammonium nitrate. *Electrochimica Acta*. 2018;278:421–437.
26. Williams G, Grace R, Woods RM. Inhibition of the localized corrosion of Mg alloy AZ31 in chloride containing electrolyte. *Corrosion*. 2015;71(2):184–198.
27. 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;72(4):739–747.
28. 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;40(8):2254–2265.
29. Song H., Xu Z., Benabou L., Yin Z., Guan H., Yan H., et al. 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;11(1):287–300.
30. 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;217:115692.
31. Ali A., Pervaiz M., Saeed Z., Younas U., Bashir R., Ullah S., et al. Synthesis and biological evaluation of 4-dimethylaminobenzaldehyde derivatives of Schiff bases metal complexes: A review. *Inorganic Chemistry Communications*. 2022;145:109903.
32. 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;463:129505.
33. He X., Chiu C., Esmacher M.J., Liang H. Nanostructured photocatalytic coatings for corrosion protection and surface repair. *Surface and Coatings Technology*. 2013;237:320–327.
34. 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;204(9–10):1479–1486.
35. 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;40(11):1915–1926.
36. Lamaka S.V., Knörnschild G., Snihirova D.V., Taryba M.G., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S. Complex anticorrosion coating for ZK30 magnesium alloy. *Electrochimica Acta*. 2009;55(1):131–141.
37. 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;52(5):1603–1609.
38. 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;56(27):10166–10178.
39. Zhang R.F., Zhang S.F., Yang N., Yao L.J., He F.X., Zhou Y.P., et al. Influence of 8-hydroxyquinoline on properties of anodic coatings obtained by micro arc oxidation on AZ91 magnesium alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012;539:249–255.
40. 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;111:753–69.
41. 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;15(14):3035.
42. Snihirova D., Lamaka S.V., Taryba M., Salak A.N., Kallip S., Zheludkevich M.L., et al. Hydroxyapatite microparticles as feedback-active reservoirs of corrosion inhibitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010;2(11):3011–3022.
43. Zheludkevich M. Self-healing anticorrosion coatings. In: *Self-healing materials: Fundamentals, design strategies, and applications*. Weinheim, Germany: John Wiley and Sons. 2009; p. 101–139.
44. Taryba M., Lamaka S.V., Snihirova D., Ferreira M.G.S., Montemor M.F., Wijting W.K., et al. 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;56(12):4475–4488.

45. 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;283:1845–1857.

46. 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;11(10):3688–3709.

47. Lv Y., Zhang Y., Meng X., Dong Z., Zhang X. Construction of a PEO/Mg–Mn LDH composite coating on Mg–Ag–Mn alloy for enhanced corrosion resistance and antibacterial potential. *Ceramics International*. 2023;49(22):35632–35643.

48. Kaseem M., Ko Y.G. Formation of flower-like structures for optimizing the corrosion resistance of Mg alloy. *Materials Letters*. 2018;221:196–200.

49. 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;356:850–856.

50. 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;823:153787.