

УДК 620.197.3

Применение электродугового нанесения алюминия и супергидрофобизации для защиты магниевых сплавов от коррозии

А.М. Емельяненко,^{1*} К.А. Емельяненко,¹ Л.Х. Балдаев,²
С.А. Маньковский,² М.О. Федорова,² С.Л. Балдаев² и
Л.Б.Бойнович^{1*}

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), Ленинский просп.31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

²ООО “Технологические системы защитных покрытий” (ООО “ТСЗП”), ул. Южная 9А, г. Щербинка, Москва, 108851 Россия

*E-mail: ame@phycha.ac.ru

Аннотация

Эксплуатация магния и его сплавов ограничена их низкой коррозионной стойкостью. Поэтому в реальных условиях необходимо модифицировать поверхностные свойства изделий из магниевых сплавов так, чтобы остановить или существенно замедлить разрушительные коррозионные процессы. В данной работе предложен подход к получению противокоррозионных покрытий для магниевых сплавов, основанный на электродуговом нанесении слоя алюминия на поверхность магния, лазерной обработке этого слоя и последующей хемосорбции гидрофобного агента. Получающееся по предложенной технологии покрытие является супергидрофобным и характеризуется очень высокой стойкостью супергидрофобного состояния при контакте с коррозионно-активными средами. Длительные исследования покрытия на водостойкость, устойчивость к солевому туману и при погружении в хлоридсодержащий раствор показало очень высокую химическую стойкость покрытия и сохранение чрезвычайно высоких противокоррозионных свойств даже при непрерывном контакте с солевым раствором в течение 2-х месяцев. Наблюдающаяся эффективность коррозионной защиты разработанных покрытий объясняется супергидрофобным состоянием поверхности и большей химической инертностью оксида алюминия по сравнению с оксидами и гидроксидами магния.

Ключевые слова: магний, защита от коррозии, супергидрофобность, ток коррозии, спектроскопия электрохимического импеданса, электродуговое нанесение

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.; После доработки 24.04.2024 г.; Принята к публикации 06.05.2024 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-2-1-12](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-2-1-12)

Введение

Магний и сплавы на его основе обладают целым комплексом уникальных свойств, чрезвычайно привлекательных для использования в различных задачах. Благодаря таким качествам, как пластичность, хорошая прессуемость, ковкость, способность к прокатке и к резанию, в сочетании с низкой плотностью, делает эти материалы привлекательными для применения в различных областях машиностроения, медицине, авиа и автомобилестроении и пр. К сожалению, широкое использование этих материалов ограничено их низкой коррозионной стойкостью. Для успешной эксплуатации в реальных условиях необходимо модифицировать поверхностные свойства изделий из магниевых сплавов так, чтобы остановить или существенно замедлить разрушительные коррозионные процессы.

Одним из наиболее перспективных способов подавления разрушительного воздействия различных коррозионных сред является обработка, приводящая к супергидрофобному состоянию поверхности обрабатываемого материала [1–7]. Такие покрытия характеризуются высокими значениями углов смачивания ($>150^\circ$) и малыми углами скатывания ($<10^\circ$) капель воды с поверхности при ее наклоне [8, 9]. Согласно современным воззрениям, для успешного получения супергидрофобных покрытий на любом материале необходимо решить три проблемы [1]. Это формирование на поверхности материала многомодальной шероховатости, повышение локального угла смачивания за счет использования элементов текстуры с нужной кривизной и, наконец, понижение поверхностной энергии элементов текстуры путем осаждения на них веществ с низкой поверхностной энергией.

Подход к защите различных металлических материалов на основе применения супергидрофобных покрытий интенсивно развивается в последние годы. Однако, нужно отметить, что хотя в литературе и предложено много технологических приемов и способов, позволяющих создавать супергидрофобные покрытия на поверхности магниевых сплавов [1], полученные к настоящему моменту результаты не позволяют говорить о долговечности защитных свойств покрытий на магниевых сплавах при их длительном непрерывном контакте с агрессивными средами. Особенностью большинства работ, в которых создавались супергидрофобные покрытия на магнии, является то, что сначала поверхностный слой исходного материала модифицировался так, чтобы сформировать иерархическую шероховатость и усилить барьерные свойства поверхностного слоя. Это делалось разными способами: травлением, гидротермальной обработкой, плазменным электролитическим оксидированием и т.д. На следующем этапе с помощью нанесения гидрофобизатора понижали поверхностную энергию поверхности, модифицированной на предыдущем этапе. Несмотря на то, что в начальный момент времени или при небольших временах воздействия агрессивной среды, созданные покрытия демонстрируют высокие защитные свойства [1], при больших временах наблюдается значительный рост тока коррозии и падение модуля импеданса, что указывает на деградацию защитных свойств. Можно предположить, что невысокие защитные свойства представленных в литературе покрытий связаны с дефектностью и низкой

адгезией к основному материалу различных соединений магния, получаемых при модификации его поверхности. Например, хорошо известна низкая защитная способность оксидов и гидроксидов магния, связанная с большой разницей плотностей чистого магния и этих соединений. Эта особенность не позволяет создать покрытие с низкой плотностью дефектов, которое, после превращения его в супергидрофобное, сможет защищать материал в течение длительного времени.

Однако идея создания защитного супергидрофобного покрытия на магниевых сплавах может быть реализована с помощью другой схемы. Покрытие с требуемой текстурой может быть получено не за счет модификации поверхностного слоя исходного материала, а с помощью нанесения на поверхность защищаемого магниевого сплава достаточно толстого слоя материала с лучшими барьерными свойствами, чем у исходного магниевого сплава, и одновременно имеющего высокую адгезию к поверхности. Дальнейшее текстурирование нанесенного слоя и снижение его поверхностной энергии позволит в этом случае получить синергетический эффект от супергидрофобного состояния поверхности и высоких барьерных свойств нанесенного материала.

В качестве материала для такого покрытия может быть использован алюминий. Выбор алюминия обусловлен следующими факторами. Этот материал имеет хорошую адгезию к магнию, близкие коэффициенты термического расширения и теплопроводности. Кроме того, супергидрофобные покрытия на основе алюминия обладают высокими защитными свойствами в течение длительного времени [10–13]. В данной работе мы обсудим метод получения такого слоистого покрытия и покажем его поведение при длительном контакте с хлоридсодержащими коррозионными средами.

Экспериментальная часть

В этой работе супергидрофобные противокоррозионные покрытия получали на поверхности магниевого сплава МА8 в трехступенчатом процессе. Для исследования характеристик покрытия использовали образцы размером $20 \times 80 \times 2$ мм.

На первом этапе изготовления образцов проводилась пескоструйная обработка магниевого сплава для удаления загрязнений и активации поверхности перед нанесением покрытия из алюминия. Далее, с применением установки электродуговой металлизации ТСЗП-ЭДМ-350 (рисунок 1) проводили напыление покрытия толщиной 200–250 мкм. В качестве материала для напыления использовалась алюминиевая проволока АД1 диаметром 2,5 мм. Принципиальная схема процесса металлизации представлена на рисунке 2.

В процессе напыления проволока из двух катушек подается с заданной скоростью в коаксиальные кабели, затем поступает в пистолет-металлизатор. В сопловой части пистолета-металлизатора сближение двух проволок, подсоединенных к источнику электрического напряжения, приводит к образованию дуги, расплавляющей металл. Подаваемый в центральную сопловую часть сжатый воздух диспергирует жидкий расплавленный металл. Капли расплавленного металла, попадая на покрываемую поверхность, ударяются о

поверхность, растекаются по ней и образуют сплошное покрытие. Толщина слоя покрытия регулируется числом проходов и скоростью перемещения пистолета-металлизатора относительно покрываемой поверхности [14]. При напылении покрытия использовались параметры режима, представленные в таблице 1.



Рисунок 1. Внешний вид установки электродуговой металлизации ТСЗП-ЭДМ-350.

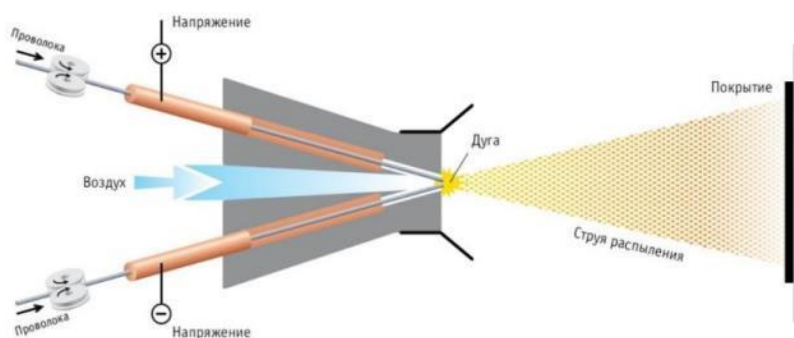


Рисунок 2. Схема процесса электродуговой металлизации.

Таблица 1. Параметры режима напыления.

Наименование параметра	Величина
Напряжение, В	26–32
Ток, А	270–330
Давление сжатого воздуха, МПа	0,45–0,55
Дистанция, мм	150–250
Шаг, мм	5
Скорость перемещения пистолета, м/с	0,5

После нанесения слоя алюминия толщиной 250 мкм, поверхность образца подвергалась обработке импульсным излучением инфракрасного лазера с длиной волны 1064 мкм. Основные параметры лазерной обработки: размер фокального пятна 40 мкм, длительность одного импульса – 200 нс, частота импульсов –

20 кГц, энергия импульса – 1 мДж, скорость движения лазерного луча – 200 мм/с, количество линий – 150 мм^{-1} . Для лазерной обработки использовался лазерный комплекс Argent-M (Россия), номинальной мощности 20 Вт с иттербиевым лазером и системой управления лазерным лучом для 2-х осевого сканирования RAYLASE MS10 (Германия). Получающаяся после лазерной обработки поверхность очищалась от слабо связанных с ней частиц с применением промывки в воде, в ультразвуковой ванне в течение 5 мин и далее 30 мин сушилась в печи при температуре 130°C . Нанесенное покрытие, имеющее многомодальную шероховатость, является супергидрофильным, поскольку капля воды, нанесенная на такую поверхность, очень быстро растекается по поверхности и впитывается в текстуру. Для того, чтобы сделать поверхность покрытия супергидрофобным, проводилась обработка образцов в кислородной плазме для прививки к поверхности гидроксильных и карбоксильных групп и затем, методом химического осаждения из паров при температуре 95°C , на поверхность хеморобировался гидрофобный агент – фтороксисилан $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{CH}_2\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$. Для завершения закрепления на поверхности гидрофобного агента, образцы выдерживались при температуре 150°C в течение 1 ч для сшивки концевых оксиметильных групп с образованием силоксановой связи между соседними молекулами гидрофобного агента.

Углы смачивания и скатывания для капель воды на полученных образцах исследовали с применением установок, разработанных в лаборатории ранее [10]. Ниже в качестве углов смачивания и скатывания представлены средние значения, определенные по пяти различным участкам на каждом исследуемом образце.

Влияние длительного контакта полученного образца с 0,5 М раствором NaCl, с солевым туманом или водным аэрозолем на морфологию поверхности покрытия исследовали методом растровой электронной микроскопии с применением микроскопа Tescan Amber GMH (Tescan, Чехия). Изображения получали при ускоряющих напряжениях 0,5–20 кВ, используя детектор вторичных электронов Everhart-Thornley при рабочих расстояниях 4–8 мм и увеличениях $\times 750$ – 100000 . Элементный состав до и после коррозионных испытаний покрытий определяли с помощью энергодисперсионной спектроскопии с использованием детектора Oxford Instruments X-MAX EDS при ускоряющих напряжениях 20 кВ, при рабочем расстоянии 6 мм.

Испытание созданных покрытий на влагоустойчивость проводили в камере Specklimat 150-11.КТВ-0,4 (Россия) в течение 21 сут. циклического режима при следующих параметрах. Продолжительность одного цикла составляла 24 ч, из которых 16 ч образец находился при температуре $+40(\pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(95 \pm 3)\%$. Далее образцы вместе с камерой охлаждались на 5° в течение 8 ч, при этом относительная влажность временно повышалась до значений, превышающих 100%

Испытание покрытий на воздействие соляного (морского) тумана проводились в камере тумана Specklimat 150-01.КТСТ-0,4 (Россия) с использованием капель раствора хлористого натрия с концентрацией $33(\pm 3) \text{ г/л}$ и радиусом капель не более 20 мкм.

Каждый цикл воздействия морского тумана длился 2 ч с температурой воздуха $+20(\pm 2)^{\circ}\text{C}$, и влажностью тумана – от 2 до 3 г/м³. Далее в течение 22 ч температура воздуха поддерживалась $+35(\pm 2)^{\circ}\text{C}$, при относительной влажности от 90% до 95%. Было проведено 3 цикла воздействия морского тумана.

Электрохимические свойства покрытий изучались с помощью электрохимической рабочей станции Элинс Р45Х (Россия), имеющей встроенный модуль FRA 24М для электрохимической импедансной спектроскопии.

Измерения проводились в трехэлектродной электрохимической ячейке в водном 0,5 М растворе NaCl, в которой образец магниевых сплавов с покрытием служил в качестве рабочего электрода (площадь зоны, контактировавшей с электролитом, была равна 1 см²), материалом противэлектрода служила платиновая сетка, а электродом сравнения был хлорсеребряный электрод, заполненный насыщенным раствором KCl. Измерения проводили при комнатной температуре. Для приготовления электролитов использовались деионизированная вода сопротивлением 18 МОм·см и соли марки х.ч. Первое измерение электрохимических характеристик на свежеприготовленном образце проводили после 2-х часов контакта с солевым раствором. Далее образец непрерывно находился в контакте с электролитом в течение 2-х месяцев, и все измерения проводились на одном и том же участке поверхности.

Потенциодинамические поляризационные кривые измеряли при развертке потенциала со скоростью 1 мВ/с в сторону положительных значений. Поляризацию образца осуществляли в интервале значений от $E = E_{\text{oc}} - 250$ мВ до $E = E_{\text{oc}} + 500$ мВ, где E_{oc} – потенциал открытой цепи. Запись спектра электрохимического импеданса проводили при потенциале открытой цепи в интервале частот от 100 кГц до 0,05 Гц с логарифмической разверткой 20 точек на декаду. Использовался возмущающий сигнал синусоидальной формы амплитудой 20 мВ.

Результаты и обсуждение

Исследование смачивания созданных покрытий показало, что текстурированные лазерным излучением и гидрофобизованные алюминиевые покрытия, нанесенные на магниевый сплав, характеризуются очень высокими углами смачивания и низкими углами скатывания (таблица 2). Испытания на длительный контакт с атмосферой, содержащей насыщенные и пересыщенные водяные пары при повышенных температурах, показали неизменность водоотталкивающих свойств на протяжении всех 21 сут. эксперимента, с сохранением начальных значений угла смачивания. Коррозионных повреждений на поверхности образца обнаружено не было. После испытаний в камере солевого тумана угол смачивания немного снизился, а угол скатывания вырос (таблица 2). Однако наблюдающиеся изменения находятся в пределах ошибки измерения. Измерения угла смачивания проводились и после длительного нахождения образцов с покрытием в электрохимической ячейке. Основными факторами, которые могли бы привести к деградации супергидрофобного покрытия, в последнем случае, являются длительный и непрерывный контакт с хлоридсодержащей коррозионно-активной

средой и многократная электрохимическая поляризация поверхности при измерениях спектров импеданса и токов. В таблице 2 также приведены значения углов смачивания и скатывания после 2-х месяцев электрохимических измерений. Из приведенных данных видно, что воздействие коррозионно-активной среды не приводит к значимой деградации супергидрофобного состояния и даже после длительного воздействия хлоридсодержащих сред покрытия сохраняют очень высокие углы смачивания.

Таблица 2. Углы смачивания и скатывания воды на полученных покрытиях

Образец	Краевой угол, °	Угол скатывания, °
Исходный образец (до испытания)	$165,6 \pm 1,7$	$1,5 \pm 0,7$
После камеры солевого тумана	$163,4 \pm 3,0$	$3,0 \pm 0,6$
После 2 месяцев контакта с 0,5 М раствором NaCl	$163,3 \pm 1,9$	$5,3 \pm 1,3$

Микроструктура свежеприготовленного покрытия и покрытия после испытаний в камере солевого тумана представлена на рисунке 3.

(а)

(б)

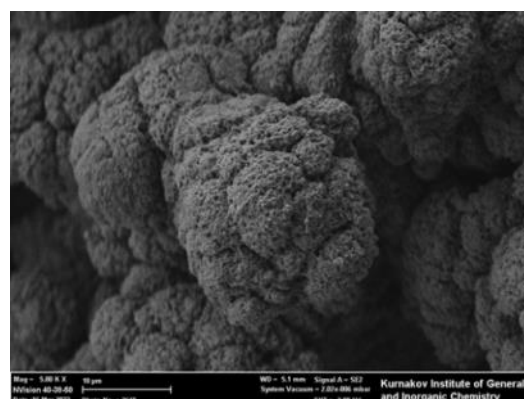
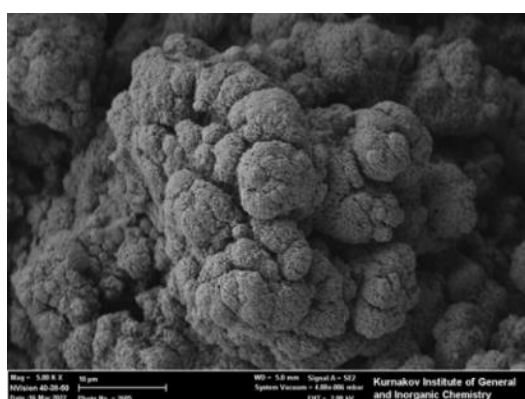


Рисунок 3. Морфология свежеприготовленного покрытия (а) и покрытия после 72 ч нахождения в камере солевого тумана (б).

Результаты исследования поверхности методом РЭМ после воздействия коррозионных сред свидетельствуют о том, что морфология поверхности практически не меняется. Типичные изображения представлены на рисунке 3. На приведенных изображениях хорошо видно, что поверхность имеет характерную иерархическую шероховатость, где и элементы текстуры, и поры имеют микро- и наноразмеры. Как отмечалось нами ранее [10], наличие нанопор в поверхностном слое способствует инкапсулированию в них избыточного количества гидрофобизатора за счет капиллярной конденсации. Такой избыток гидрофобизатора оказывается полезным для самозалечивания и самовосстановления супергидрофобных свойств при удалении гидрофобизатора с отдельных участков покрытия в условиях эксплуатации. По-видимому, именно благодаря такому запасу гидрофобного агента и спонтанному восстановлению

гидрофобного слоя при контакте с агрессивными средами не происходит деградации супергидрофобных свойств.

Рассмотрим теперь электрохимическое поведение разработанного покрытия при длительном контакте с 0,5 М водным раствором NaCl. На рисунке 4а показаны поляризационные кривые, а на рисунке 4б – спектры модулей импеданса для покрытия, находившегося в контакте с солевым раствором 2 ч, 10, 20, 35, 49 и 60 дней. Из представленных данных следует, что после первых двух часов погружения в раствор значения токов коррозии ($i = 3 \cdot 10^{-10}$ А/см²) и модуля импеданса ($Z_{f=0,05 \text{ Гц}} = 38$ МОм·см²) соответствуют высокому уровню коррозионной защиты магния разработанным покрытием. Отметим для сравнения, что для используемого магниевового сплава без покрытия ток коррозии через 2 ч контакта с покрытием составляет $2,8 \cdot 10^{-5}$ А/см² [1], что на 5 порядков выше тока коррозии для покрытия. Анализ данных, представленных на рисунке 4, показывает, что значительное изменение электрохимических параметров покрытия наблюдается лишь в первые дни контакта покрытия с коррозионной средой. Дальнейшее увеличение времени приводит лишь к незначительному изменению параметров импеданса и поляризационных кривых. После 60 дней непрерывного контакта с хлоридсодержащей средой ток коррозии составляет $8 \cdot 10^{-9}$ А/см², а модуль импеданса превышает $Z_{f=0,05 \text{ Гц}} = 1,2$ МОм·см². Эффективность коррозионной защиты r_{cor} магниевового сплава созданным покрытием даже после 60 сут. составляет:

$$r_{\text{cor}} = 100\% \cdot (i_{\text{покрытия}} - i_{\text{Mg}}) / i_{\text{Mg}} = 99,97\%.$$

Таким образом, сохранение супергидрофобного состояния поверхности одновременно со слабым изменением электрохимических параметров покрытия во времени и высокой эффективностью противокоррозионной защиты, даже после длительного погружения в коррозионно-активный раствор, позволяет рассматривать полученное покрытие, как одно из лучших противокоррозионных покрытий, представленных в литературе [2, 3, 5, 7, 15–17].

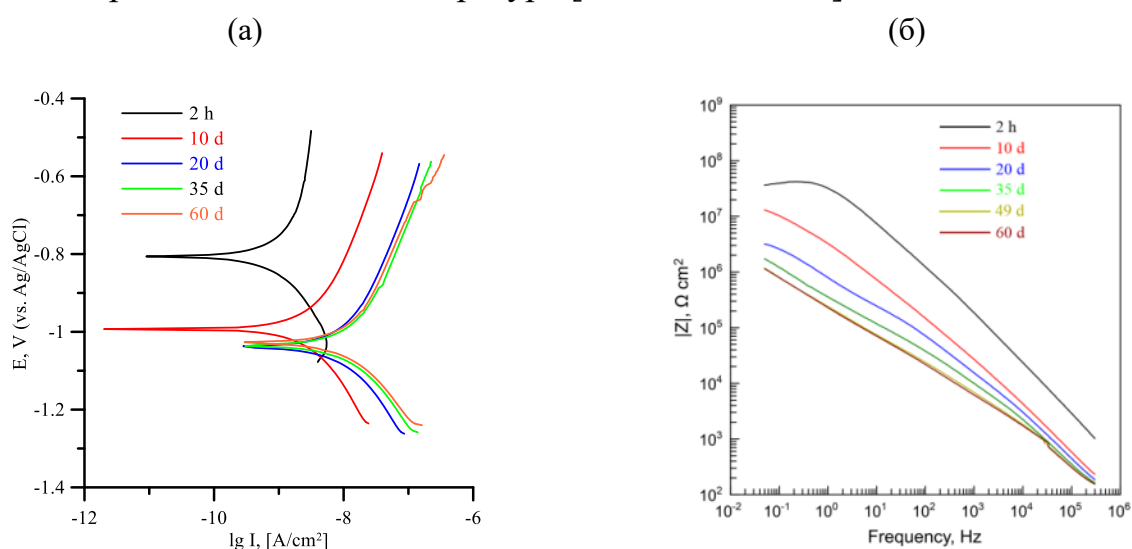


Рисунок 4. Поляризационные кривые (а) и спектры модулей импеданса (б) для покрытия, находившегося в контакте с солевым раствором 2 ч, 10, 20, 35, 49 и 60 дней.

Заключение

В данной работе мы предложили подход к получению противокоррозионных покрытий для магниевых сплавов, основанный на электродуговом нанесении слоя алюминия на поверхность магния, лазерной обработке этого слоя и последующей хемосорбции гидрофобного агента. Получающееся по предложенной технологии покрытие является супергидрофобным и характеризуется очень высокой стойкостью супергидрофобного состояния при контакте с коррозионно-активными средами. Длительные исследования покрытия на водостойкость, устойчивость к солевому туману и при погружении в хлоридсодержащий раствор, показали очень высокую химическую стойкость покрытия и сохранение чрезвычайно высоких противокоррозионных свойств даже при непрерывном контакте с соевым раствором в течение 2-х месяцев. Наблюдающуюся эффективность коррозионной защиты разработанных покрытий можно объяснить двумя факторами. С одной стороны, это супергидрофобность покрытия, которая обеспечивает противокоррозионную защиту за счет следующих механизмов. Это минимизация площади контакта покрытия с коррозионной средой за счет водоотталкивающих свойств, барьерные свойства оксида алюминия, определяющего химический состав элементов текстуры после лазерной обработки поверхности, отрицательный заряд межфазной границы покрытие/электролит, приводящий к отталкиванию коррозионно-активных анионов от покрытия. Наконец, блокирование адсорбционно-активных центров поверхности слоем гидрофобного агента ингибирует адсорбцию коррозионно-активных ионов на межфазную границу, что также замедляет развитие коррозионного процесса. С другой стороны, большая химическая инертность оксида алюминия по сравнению с оксидами и гидроксидами магния обеспечивает большую стойкость супергидрофобных покрытий на магнии с алюминиевым подслоем, по сравнению с аналогичными покрытиями на магнии.

Благодарности: авторы выражают признательность М.А. Живохино и А.И. Иржавскому за проведение коррозионных испытаний в камере солевого тумана.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. L.B. Boinovich, K.A. Emelyanenko and A.M. Emelyanenko, The mechanisms and advances in magnesium-based materials protection against corrosion by the superhydrophobic coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 2024, 481, 130607. doi: [10.1016/j.surfcoat.2024.130607](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130607)
2. J. Zhang, J. Wei, B. Li, X. Zhao and J. Zhang, Long-term corrosion protection for magnesium alloy by two-layer self-healing superamphiphobic coatings based on shape memory polymers and attapulgite, *J. Colloid Interface Sci.*, 2021, 594, 836–847. doi: [10.1016/j.jcis.2021.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.03.005)

3. X. Zhao, J. Wei, B. Li, S. Li, N. Tian, L. Jing and J. Zhang, A self-healing superamphiphobic coating for efficient corrosion protection of magnesium alloy, *J. Colloid Interface Sci.*, 2020, 575, 140–149. doi: [10.1016/j.jcis.2020.04.097](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.097)
4. K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, E.V. Chulkova, A.M. Emelyanenko and L.B. Boinovich, Thermally induced gradient of properties on a superhydrophobic magnesium alloy surface, *Metals*, 2020, 11, 41. doi: [10.3390/met11010041](https://doi.org/10.3390/met11010041)
5. J. Joo, D. Kim, H.S. Moon, K. Kim and J. Lee, Durable anti-corrosive oil-impregnated porous surface of magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation with hydrothermal treatment, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, 509, 145361. doi: [10.1016/j.apsusc.2020.145361](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145361)
6. Y. Wang, X. Zhou, M. Yin, J. Pu, N. Yuan and J. Ding, Superhydrophobic and self-healing Mg-Al layered double hydroxide/silane composite coatings on the Mg alloy surface with a long-term anti-corrosion lifetime, *Langmuir*, 2021, 37(27), 8129–8138. doi: [10.1021/acs.langmuir.1c00678](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00678)
7. K.A. Emelyanenko, E.V. Chulkova, A.M. Semiletov, A.G. Domantovsky, V.V. Palacheva, A.M. Emelyanenko and L.B. Boinovich, The potential of the superhydrophobic state to protect magnesium alloy against corrosion, *Coatings*, 2022, 12, 74. doi: [10.3390/coatings12010074](https://doi.org/10.3390/coatings12010074)
8. A. Marmur, C. Della Volpe, S. Siboni, A. Amirfazli and J.W. Drelich, Contact angles and wettability: Towards common and accurate terminology, *Surface Innovations*, 2017, 5, 3–8. doi: [10.1680/jsuin.17.00002](https://doi.org/10.1680/jsuin.17.00002)
9. L.B. Boinovich and A.M. Emelyanenko, Hydrophobic materials and coatings: Principles of design, properties and applications, *Usp. Khim.*, 2008, 77, 619–638. doi: [10.1070/RC2008v077n07ABEH003775](https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775)
10. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, A.A. Shiryaev, K.A. Emelyanenko, O.V. Dvoretzskaya and A.A. Ganne, Corrosion behavior of superhydrophobic aluminum alloy in concentrated potassium halide solutions: When the specific anion effect is manifested, *Corros. Sci.*, 2016, 112, 517–527. doi: [10.1016/j.corsci.2016.08.019](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.019)
11. Z. He, H. Cao, M. Zhou, W. Jia, X. Shen, Y. Min and Q. Xu, Superior corrosion resistance and anti-biofouling performance via electrodeposited graphene oxide/silane composite coating with special wettability, *Surf. Coat. Technol.*, 2022, 449, 128952. doi: [10.1016/j.surfcoat.2022.128952](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128952)
12. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky and K.A. Emelyanenko, Not simply repel water: The diversified nature of corrosion protection by superhydrophobic coatings, *Mendeleev Commun.*, 2017, 27, 254–256. doi: [10.1016/j.mencom.2017.05.012](https://doi.org/10.1016/j.mencom.2017.05.012)
13. T.P. Rasitha, S.C. Vanithakumari, D.N.G. Krishna, R.P. George, R. Srinivasan and J. Philip, Facile fabrication of robust superhydrophobic aluminum surfaces with enhanced corrosion protection and antifouling properties, *Prog. Org. Coat.*, 2022, 162, 106560. doi: [10.1016/j.porgcoat.2021.106560](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106560)
14. Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин и др., Газотермическое напыление: уч. пособие для вузов, 2-е изд., М: Старая Басманная, 2015, 539 с. ISBN 978-5-906470-45-4.

-
15. K.V. Nadaraia, S.N. Suchkov, I.M. Imshinetskiy, D.V. Mashtalyar, D.Yu. Kosianov, E.A. Belov, S.L. Sinebryukhov and S.V. Gnedenkov, New superhydrophobic composite coatings on Mg-Mn-Ce magnesium alloy, *J. Magnes. Alloys*, 2023, 11, 1721–1739. doi: [10.1016/j.jma.2023.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.03.006)
 16. L. Telmenbayar, A.G. Ramu, D. Yang and D. Choi, Development of mechanically robust and anticorrosion slippery PEO coating with metal–organic framework (MOF) of magnesium alloy, *Chem. Eng. J.*, 2023, 458, 141397. doi: [10.1016/j.cej.2023.141397](https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141397)
 17. И.А. Кузнецов, О.А. Гончарова, А.А. Чиркунов, А.Ю. Лучкин, В.А. Лучкина, Н.Н. Андреев и Ю.И. Кузнецов, Строение и свойства защитных пленок олеиновой кислоты при контактной и камерной защите металлов. 1. Магний, *Коррозия: защита материалов и методы исследований*, 2024, 2(1), 23–40. doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-1-23-40](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-1-23-40)

Application of electric arc deposition of aluminum and superhydrophobization to protect magnesium alloys against corrosion

A.M. Emelyanenko,^{1*} K.A. Emelyanenko,¹ L.Kh. Baldaev,²
S.A. Man'kovsky,² M.O. Fedorova,² S.L. Baldaev,² L.B. Boinovich¹

¹A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Leninsky prosp. 31 bldg. 4, 119071 Moscow, Russia

²LLC "Technological Systems of Protective Coatings" (LLC "TSPC"),
Yuzhnaya str. 9A, Shcherbinka, Moscow, 108851 Russia

*E-mail: ame@phyche.ac.ru

Abstract

The use of magnesium and its alloys is limited due to their low corrosion resistance. In real-world conditions, it is therefore necessary to modify the surface properties of magnesium alloy products in order to prevent or significantly slow down destructive corrosion processes. This paper proposes an approach for creating anti-corrosion coatings on magnesium alloys through the use of electric arc deposition of aluminum layer on alloy surface, laser processing of this layer, followed by chemisorption of a hydrophobic agent. The resulting coating, created using this method, is superhydrophobic and has a high level of resistance to corrosion under contact with corrosive media. Long-term studies on the coating's water resistance, salt spray resistance, and immersion in a chloride-containing solution have shown that the coating has a very high chemical resistance and retains its extremely high anti-corrosive properties even after continuous contact with saline solution for two months. The effectiveness of corrosion protection provided by the developed coatings can be explained by the superhydrophobic state of their surface and the greater chemical inertness of aluminum oxide compared to magnesium oxides and hydroxides.

Keywords: *magnesium, corrosion protection, superhydrophobicity, corrosion current, electrochemical impedance spectroscopy, electric arc deposition.*