

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА МАГНИЕВОГО АНОДА НА ЕГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАГНИЙ-ИОННЫМ АККУМУЛЯТОРАМ

А.А. Леонов¹, С.В. Заварзин¹, Н.В. Трофимов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены исследования влияния состава анода, изготовленного из различных литейных магниевых сплавов, на его электрохимическое поведение в растворе 3,5%-ного NaCl методами гальваностатического электролиза и спектроскопии электрохимического импеданса. Установлено, что использование редкоземельных элементов (РЗЭ) в качестве легирующих элементов благоприятно сказывается на разрядных характеристиках, позволяя повысить анодную эффективность и разрядную емкость сплава ВМЛ26 системы Mg–РЗЭ–Zr по сравнению со сплавом МЛ5п.ч. системы Mg–Al–Zn на 15 и 7 % соответственно.

Ключевые слова: магниевые сплавы, магний-ионный аккумулятор, перезаряжаемая магниевая батарея, анод, электролит, разрядные характеристики

Для цитирования: Леонов А.А., Заварзин С.В., Трофимов Н.В. О некоторых особенностях влияния состава магниевых сплавов на его электрохимическое поведение применительно к магний-ионным аккумуляторам // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28.

Scientific article

ON SOME FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE MAGNESIUM ANODE ON ITS ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR IN RELATION TO MAGNESIUM-ION BATTERIES

A.A. Leonov¹, S.V. Zavarzin¹, N.V. Trofimov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The influence of the composition of the anode made of various casting magnesium alloys on its electrochemical behavior in a solution of 3.5% NaCl by galvanostatic electrolysis and electrochemical impedance spectroscopy has been studied. It has been established that the use of rare earth elements (REE) as alloying elements has a beneficial effect on discharge characteristics, which allows increasing the anode efficiency and discharge capacity of the VML26 alloy of the system Mg–REE–Zr compared to the Mg–Al–Zn alloy ML5p.ch. by 15 and 7 %, respectively.

Keywords: magnesium alloys, magnesium-ion battery, rechargeable magnesium battery, anode, electrolyte, discharge characteristics

For citation: Leonov A.A., Zavarzin S.V., Trofimov N.V. On some features of the influence of the composition of the magnesium anode on its electrochemical behavior in relation to magnesium-ion batteries. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28.

Введение

В связи с прогнозируемым экспоненциальным ростом потребления литий-ионных аккумуляторов, обусловленным развитием и расширением производства во многих отраслях промышленности, таких как портативная электроника, электромобили, возобновляемая энергетика, медицинская и промышленная техника, сектор энергоэффективных технологий, электрификация авиационной отрасли, а также имеющимися у них недостатками, к которым относятся недостаточные удельная мощность, работоспособность в широком диапазоне температур, циклический ресурс, удельная энергия, безопасность, стоимость и ограниченность сырьевой базы, инициированы многочисленные исследовательские работы, направленные на поиск альтернативных источников энергии [1–4].

В настоящее время магний-ионные аккумуляторы являются одним из наиболее перспективных направлений развития, что обусловлено [5, 6]:

– геохимическим фактором, указывающим на значительное распространение элемента магния в земной коре (в отличие от лития), последующими экономическими выгодами и масштабируемостью;

– электрохимическими свойствами, а именно – двухвалентной формой заряда, способствующей достижению более высоких характеристик емкости и цикличности, а также пониженной склонностью к протеканию побочных реакций и разрушению во время циклической работы, в том числе из-за пониженной предрасположенности к формированию дендритных отложений;

– термическими характеристиками, определяющими устойчивость работы при отрицательных и повышенных температурах.

В таких аккумуляторах магниевый анод имеет важное значение в качестве источника ионов Mg^{2+} , которые, мигрируя через электролит между анодом и катодом и встраиваясь в их структуру, обеспечивают цикл зарядки-разрядки. Однако использование магния в качестве основы электродов сопряжено с определенными технологическими сложностями. Достаточно простое взаимодействие магния с электролитом приводит к формированию стабильной пленки оксида на поверхности анода, что препятствует эффективной работе аккумулятора из-за ее непроницаемости для ионов, а низкая коррозионная стойкость, присущая магнию и сплавам на его основе, прямым образом влияет на преждевременное разрушение анода. Одним из путей решения данной проблемы являются разработка и оптимизация состава анода, которые могут обеспечить эффективное взаимодействие магния с электролитом и минимизировать образование оксидной пленки [7–9].

Легирование является эффективным методом улучшения не только прочностных, жаропрочных и коррозионных свойств, но и разрядных характеристик. В случае магниевых анодов легирующие элементы должны оказывать существенное влияние на коррозионные и электрохимические характеристики, способствовать снижению растворимости примесных элементов, отслаиванию продуктов коррозии с поверхности анода и удалению/осаждению магния в процессе циклических нагрузок [10, 11].

В авиационном материаловедении магниевые сплавы разделяют на системы Mg–Al, Mg–Zn и Mg–PЗЭ–Zr (PЗЭ – редкоземельный элемент), каждая из которых обладает рядом преимуществ для тех или иных условий эксплуатации. Например, сплав марки ВМЛ18 (Mg–Al–Zn) – коррозионностойкий, применяется во всеклиматических условиях эксплуатации; сплав марки ВМЛ20 (Mg–Zn–Zr) – высокопрочный, работоспособен в условиях воздействия высоких нагрузок; сплав марки ВМЛ26 (Mg–PЗЭ–Zr) – высокопрочный, жаропрочный и пожаробезопасный, предназначен для эксплуатации в условиях повышенных температур и нагрузок. Использование PЗЭ приводит к повышению

коррозионных характеристик сплава ВМЛ26. Испытания в 3%-ном растворе NaCl показали, что коррозионная стойкость магниевого сплава ВМЛ26, легированного РЗЭ, составляет не более $0,78 \text{ см}^3/\text{см}^2$ за 48 ч, что значительно превышает аналогичный показатель коррозии для серийного магниевого сплава МЛ5п.ч. (системы Mg–Al–Zn), который составляет $5\text{--}8 \text{ см}^3/\text{см}^2$ за 48 ч (табл. 1). Повышенная коррозионная стойкость обусловлена наличием в составе РЗЭ, которые, с одной стороны, снижают анодную активность магния, тем самым снижая скорость коррозии при контакте с электролитом, а с другой – благодаря им на поверхности формируется более устойчивая защитная оксидная пленка, препятствующая окислению материала и контакту анода с электролитом и кислородом [12–15].

Таблица 1

Сравнительные результаты исследований коррозионной стойкости серийных и новых магневых сплавов различных систем легирования

Сплав	Состояние	Основные элементы, входящие в состав	Показатель коррозионной стойкости по количеству выделившегося водорода, $\text{см}^3/\text{см}^2$
Mg95	Литое	Mg	13,5–17,2
МЛ5п.ч.	T4	Mg, Al, Zn	5,0–8,0
ВМЛ18	T4	Mg, Al, Zn, Mn, Cd	Не более 2,5
ВМЛ20	T6	Mg, Zn, Zr, Nb, Ti	4,6–4,8
ВМЛ26	T6	Mg, Zn, Zr, Gd, Nd, Y, Ce	Не более 0,78

Однако применение в конструкции аккумулятора серийных авиационных магневых сплавов без значительной доработки их состава невозможно. Так, зарубежный серийный сплав AZ31 системы Mg–Al–Zn, являющийся аналогом отечественных сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18, при плотности тока $2,5 \text{ А/г}$ имеет невысокую анодную эффективность, равную 34 %, однако после легирования церием показатели возрастают пропорционально содержанию церия в составе – максимальную анодную эффективность (45,5 %) сплав имеет при содержании 4 % (по массе) церия [8]. При этом использование вместо церия свинца или лития может обеспечить повышение анодной эффективности вплоть до 80 % [16, 17]. Магневые сплавы с РЗЭ имеют склонность к формированию более тонкого пассивационного слоя и самоотслаиванию продуктов коррозии как из-за сложного состава образующихся гидроксидов, так и ввиду несоответствия кристаллической структуры между продуктом коррозии и основным материалом, что ведет к повышению разрядного напряжения и эффективности процесса [18–20].

В данной работе исследовано влияние состава на электрохимическое поведение анодов из магневых сплавов в водном растворе электролита на основе 3,5%-ного NaCl.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магневых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [21, 22].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Для исследования использованы образцы на основе магния различных составов: чистый магний Mg95 (ГОСТ 804–93), магниевый сплав МЛ5п.ч. системы Mg–Al–Zn и

высокопрочный магниевый сплав ВМЛ26 системы Mg–P3Э–Zr. Сплавы изготавливали гравитационным литьем в индукционной плавильной установке в защитной газовой атмосфере элегаза, полученные образцы заливали в металлические изложницы. В качестве шихты использовали магний Mg95, цинк Ц0, лигатуры Al–Mn и Mg–Zr, а также гадолиний металлический и иттрий марки ИтМ.

После проведения плавки изготавливали образцы размером 15×25×1 мм. Перед началом электрохимических исследований образцы покрывали эмалью ЭП-140 за исключением рабочей поверхности, площадь которой составляла ~0,66 см², по которой в последующем определяли характеристики.

Исследование коррозионного поведения магниевых сплавов Mg95, МЛ5п.ч. и ВМЛ26 проводили путем измерения потенциала разомкнутой цепи $E_{p,ц}$ и регистрации потенциодинамических кривых в тафелевой и анодной областях методом гальваностатического электролиза и спектроскопией электрохимического импеданса. Измерения проводили на потенциостате/гальваностате в электрохимической ячейке объемом 100 мл с трехэлектродной схемой подключения, заполненной нейтральным раствором 3,5%-ного NaCl. Для рабочего электрода использовали образец исследуемого сплава, для противоэлектрода (в зависимости от ячейки) – платиновую проволоку. В качестве электрода сравнения применяли хлорсеребряный электрод (Ag/AgCl), наполненный насыщенным раствором KCl, потенциал которого относительно нормального водородного электрода равен +0,197 В. Образцы шлифовали на кругах с постепенным увеличением зернистости до P2000. Торцы и заднюю поверхность образцов покрывали непроводящим лаком, его же наносили на переднюю поверхность, оставляя непокрытый участок, благодаря чему контролировали площадь контакта. Непосредственно перед измерениями потенциала $E_{p,ц}$ и регистрацией потенциодинамических кривых с целью активации и удаления с поверхности продуктов атмосферной коррозии на рабочий электрод подавали катодный ток 10 мА в течение 2 мин. Измерения проводили при комнатной температуре без деаэрации электролита.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена микроструктура магниевых анодов выбранных составов, исследованная методом оптической микроскопии.

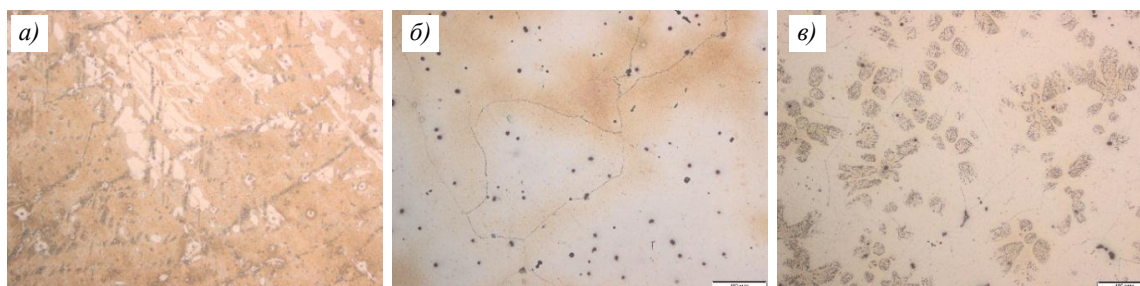


Рис. 1. Микроструктура образцов анодов из магния марки Mg95 (а) и магниевых сплавов марок МЛ5п.ч. системы Mg–Al–Zn (б) и ВМЛ26 системы Mg–P3Э–Zr (в)

Микроструктура чистого магния в литом состоянии (рис. 1, а) представляет собой однофазные крупные зерна на основе твердого раствора магния.

Микроструктура магниевых сплавов МЛ5п.ч. в термообработанном по режиму Т4 состоянии (рис. 1, б) – типичная для данной системы структура, состоящая из α -твердого раствора магния с алюминием и цинком, по границам зерен твердого раствора располагается фаза $Mg_{17}Al_{12}$. В структуре сплава также присутствуют включения марганца серого цвета округлой формы, которые располагаются беспорядочно по полю зерна, при небольшом увеличении они имеют вид черных точек.

Микроструктура сплава ВМЛ26 в термообработанном по режиму Т6 состоянии (рис. 1, в) представляет собой α -твердый раствор магния, содержащий гадолиний, неодим, цинк и цирконий с неравномерно распределенной по границам остаточной эвтектикой $Mg_3(Zn, Gd, Nd, Y)$. В объеме зерна также присутствует «лепестковидная» структура, обусловленная одновременным присутствием двух типов фаз – ядра типа $Mg_{17}(Re, Zr)_2$ и окружающей его α -магниевого матрицы.

Используемые легирующие элементы (алюминий и марганец в сплаве МЛ5п.ч. или редкоземельные элементы в сплаве ВМЛ26) используются для упрочнения системы за счет образования указанных вторичных фаз, а также для повышения коррозионной стойкости материала (табл. 1). Однако формирующиеся вторичные упрочняющие фазы вследствие разности потенциала могут являться причинами коррозии по электрохимическому механизму.

На рис. 2 представлены кривые хронопотенциометрии, показывающие изменение потенциала разомкнутой цепи $E_{p.c}$ (свободной коррозии) во времени. Измерения проводили в течение 1 ч. За стационарное значение $E_{ст}$ принимали конечное значение при условии, что параметр $E_{p.c}$ не менял свое значение в последние 30 мин более чем на 30 мВ (ГОСТ 9.912–89). Данные по $E_{ст}$ приведены в табл. 2. Анализ полученных зависимостей показал, что для сплава ВМЛ26 и чистого магния Мг95 характерно начальное снижение потенциала, указывающее на более высокую коррозионную активность, с последующей стабилизацией и достижением равновесия между коррозионными процессами и защитными механизмами на поверхности сплавов. При этом сплав МЛ5п.ч. показал более устойчивое поведение, что может быть обусловлено коррозионной стойкостью основной сплава и вторичных фаз ($Mg_{17}Al_{12}$), более равномерным распределением легирующих элементов в объеме образца, низким количеством вредных примесей, более равномерной бездефектной оксидной пленкой. Выделяющиеся в процессе термической обработки вторичные фазы любой системы легирования, как правило, являются катодами, по сравнению с анодной матрицей сплава. Исключением являются сплавы системы Mg–Al–Zn, у которых образующаяся фаза $Mg_{17}Al_{12}$ катодом не является вследствие возрастания перенапряжения выделения водорода.

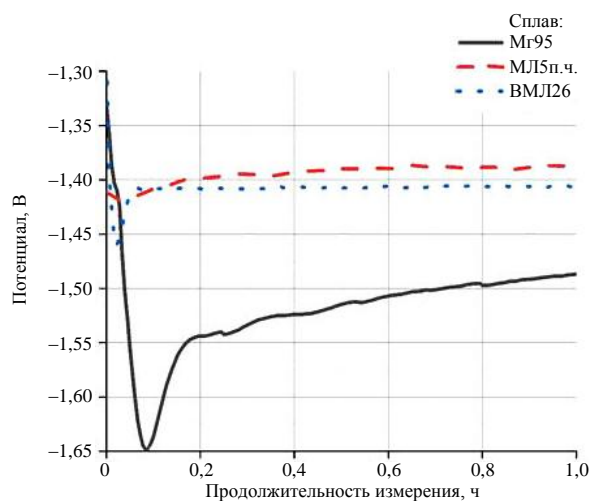


Рис. 2. Изменение потенциала разомкнутой цепи образцов магниевых сплавов во времени

Таблица 2

Сводные данные электрохимических измерений образцов магниевых сплавов

Сплав	$E_{ст}$, В	$E_{кор}$, В	$i_{кор}$, мкА/см ²
Мг95	-1,49	-1,47	81,50
МЛ5п.ч.	-1,39	-1,29	270,63
ВМЛ26	-1,41	-1,37	566,94

На рис. 3 представлены потенциодинамические кривые, полученные на образцах из магниевых сплавов в полулогарифмических координатах. С помощью уравнения Тафеля [23] получены основные электрохимические характеристики исследуемых систем: потенциал коррозии $E_{кор}$, определяемый протекающими на поверхности электрода процессами, и плотность тока коррозии $i_{кор}$, характеризующая скорость данных процессов (табл. 2).

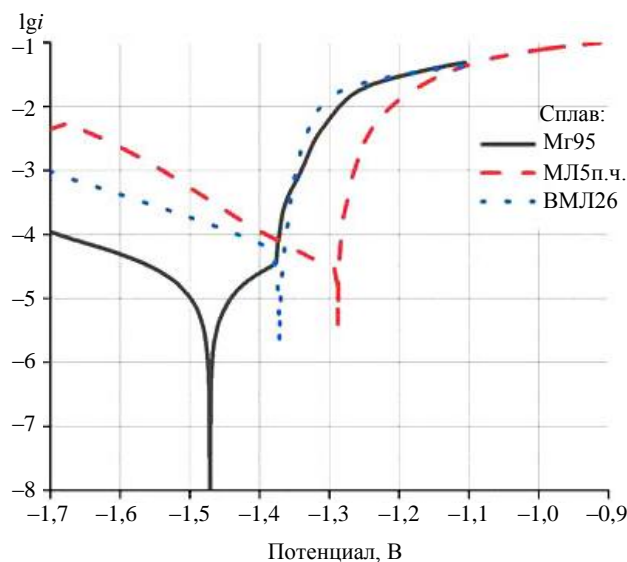


Рис. 3. Потенциодинамические кривые в координатах $lgi-E$ при $dE/dt = 0,166$ мВ/с

Форма полученных поляризационных кривых исследуемых сплавов идентична. Поскольку стандартный электродный потенциал магния более отрицателен, чем у алюминия, цинка и РЗЭ, чистый магний без каких-либо легирующих элементов имеет наиболее отрицательный потенциал коррозии $E_{кор}$ ($-1,46$ против $-1,29$ и $-1,36$ соответственно). Кроме того, параметр $E_{кор}$ является смешанным потенциалом, соответствующим взаимодействию анодных (растворение металла) и катодных (выделение водорода) реакций, поэтому этот показатель во многом определяется особенностью микроструктуры сплава, представленной на рис. 1. Более мелкие зерна ускоряют анодное растворение, но подавляют выделение водорода, в результате чего анодные ветви смещаются влево вниз, а катодные – вправо, что приводит к более отрицательному показателю у сплава ВМЛ26 по сравнению со сплавом МЛ15п.ч. [24].

Показатель плотности тока $i_{кор}$ свидетельствует о снижении коррозионной стойкости слева направо в ряду сплавов Mg95–МЛ15п.ч.–ВМЛ26, что можно объяснить формированием в структуре легированных сплавов большого количества вторичных фаз по сравнению с чистым магнием, которые усиливают гальваническую коррозию.

Построенные анодные поляризационные кривые образцов из магниевых сплавов, представленные на рис. 4, свидетельствуют об отсутствии области пассивности (области, в которой анодное растворение происходит с пренебрежимо низкими скоростями) у сплавов МЛ15п.ч. и ВМЛ26. Смещение потенциала в область положительнее $E_{кор}$ приводило к полному растворению сплавов. Для сплава Mg95 область пассивности наблюдалась, однако она не превышала 100–200 мВ.

Определение разрядной емкости (Q) и анодной эффективности (η) проводили методом гальваностатического электролиза при плотности тока 10 мА/см² в течение 5 ч. Расчет величин проводили по формулам, аналогичным приведенным в работе [25].

$$Q = \frac{I t A}{\Delta W} 1000,$$

$$\eta = \frac{3,6 I t A M}{2F \Delta W} 100 \%,$$

где I – плотность тока, А; t – время разряда, ч; A – площадь поверхности, см²; ΔW – потеря массы в процессе разряда, г; M – молярная масса, г/моль; F – постоянная Фарадея (96485 К·моль).

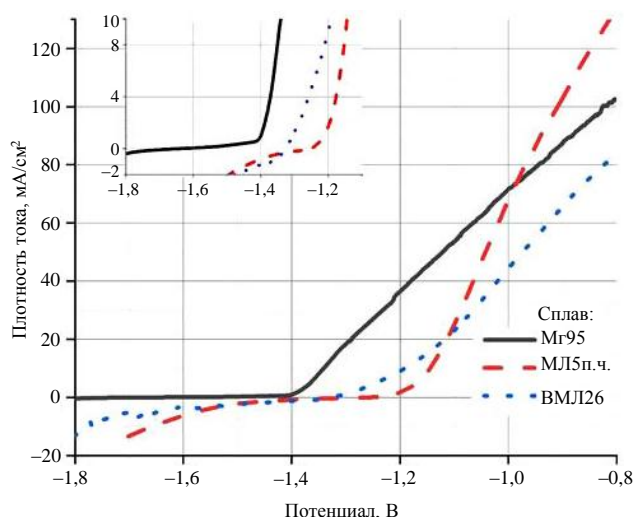


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые с врезкой увеличенных участков кривых при малых плотностях тока при $dE/dt = 1$ мВ/с

Несмотря на высокую плотность тока коррозии, для магниевого сплава ВМЛ26 выявлены повышенные значения анодной эффективности и разрядной емкости (табл. 3), свидетельствующие о его способности сохранять заряд и обеспечивать работу, что может быть обусловлено присутствием РЗЭ в составе, которые способствуют улучшению указанных характеристик. Высокая плотность тока коррозии для легированных сплавов может свидетельствовать об увеличении количества вторичных фаз за счет сложного химического состава, неравномерном распределении легирующих элементов, создающих гальванические пары и увеличивающих плотность тока за счет формирования различных мест с разной активностью коррозии, и изменении за счет легирования электрохимических свойств.

Таблица 3

Разрядные характеристики образцов из магниевых сплавов в сравнении с некоторыми зарубежными сплавами-аналогами при плотности тока 10 мА/см²

Сплав	Система сплава	Анодная эффективность, %	Разрядная емкость, мА·ч/г
Mg95	–	55,8	1232
МЛ5п.ч.	Mg–Al–Zn	49,9	1120
ВМЛ26	Mg–РЗЭ–Zr	58,3	1201
AZ31 [8]	Mg–Al–Zn	44,2	986
Mg ₃ Pr [10]	Mg–РЗЭ	34,0	–

На рис. 5 представлены диаграммы Найквиста, полученные на образцах из магниевых сплавов. Образцы испытывали в исходном состоянии после выдержки в электролите в течение 5–10 мин для стабилизации потенциала.

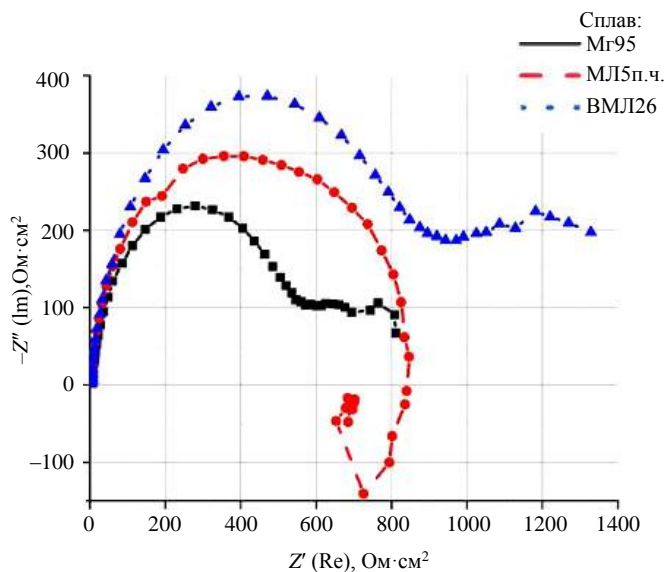


Рис. 5. Диаграммы Найквиста образцов из магниевого сплава, амплитуда напряжения 10 мВ

На кривых, полученных на образцах сплавов Mg95 и VM126, наблюдается наличие двух максимумов реактивного импеданса в низкочастотной и высокочастотной областях, что, по-видимому, связано с формированием пленки оксида или гидроксида магния. На образцах сплава ML5п.ч. в низкочастотной области наблюдается петля, которая может свидетельствовать о питтинговой коррозии или ускоренном анодном окислении сплава [26].

Заключения

Проведены исследования влияния различного состава магниевого анода на его электрохимические свойства. Установлено, что легирование чистого магния РЗЭ, несмотря на высокую плотность тока коррозии, на примере сложнолегированного сплава VM126 (по сравнению со сплавом ML5п.ч. системы Mg–Al–Zn) при плотности тока 10 мА/см² способствует повышению анодной эффективности и разрядной емкости на 15 и 7 % соответственно. Для снижения интенсивности процессов коррозии в среде в результате электрохимических реакций возможны использование защитных покрытий, предотвращающих контакт металла с коррозионно-активной средой, оптимизация состава сплава и технологии изготовления. Однако в этом случае необходимо учитывать возможные сложности с ионной миграцией в полноразмерной ячейке.

Отмечена также перспективность использования РЗЭ для дальнейших исследований, а также необходимость оптимизации состава и технологии изготовления магниевого анода.

Список источников

1. Кулова Т.Л., Скундин А.М. Проблемы развития литий-ионных аккумуляторов в мире и России // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23. № 3. С. 111–120.
2. Леонов А.А., Трофимов Н.В. Магний-ионные аккумуляторы: перспективы и вызовы в области энергетики // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.
3. Морачевский А.Г., Попович А.А. Магний-ионные аккумуляторы – новое направление исследований // Глобальная энергия. 2019. Т. 25. № 3. С. 133–139.
4. Dominko R., Bitenc J., Berthelot R. et al. Magnesium batteries: Current picture and missing pieces of the puzzle // Journal of power sources. 2020. No. 478. P. 321–339

5. Li Q., Xiong W., Yu S.Y. et al. Effect of Gd content on the discharge and electrochemical behaviors of the magnesium alloy AZ31 as an anode for Mg-air battery // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. P. 12789–12802. DOI: 10.1007/s10853-021-06135-2.
6. Li C.S., Sun Y., Gebert F., Chou S.L. Current progress on rechargeable magnesium-air battery // *Advanced Energy Materials*. 2017. Vol. 7. P. 1700869. DOI: 10.1002/aenm.201700869.
7. Deng M., Wang L.Q., Hoche D. et al. Corrosion and discharge properties of Ca/Ge micro-alloyed Mg anodes for primary aqueous Mg batteries // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 177. DOI: 108958.10.1016/j.corsci.2020.108958.
8. Shi M., Li T., Shang H. et al. A critical review of inorganic cathode materials for rechargeable magnesium ion batteries // *Journal of Energy Storage*. 2023. No. 68. P. 216–228.
9. Zhang T.R., Tao Z.L., Chen J. Magnesium-air batteries: from principle to application // *Materials Horizons*. 2014. Vol. 1. P. 196–206. DOI: 10.1039/c3mh00059a.
10. Ma B., Ouyang L., Zheng J. Magnesium-rare earth intermetallic compounds for high performance high power aqueous Magnesium-Air batteries // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 311. P. 347–361. DOI: 10.1016/j.jma.2023.6.010.
11. Mana Y., Jaumaux P., Xu Y. et al. Research development on electrolytes for magnesium-ion batteries // *Science Bulletin*. 2023. No. 68. P. 1819–1842.
12. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС – ВИАМ, 2002. С. 23–47.*
13. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
14. Трофимов Н.В., Леонов А.А., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Литейные магниевые сплавы (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2016. № 12 (48). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-1-1.
15. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое окисление магниевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
16. Wang L., Wang R., Feng Y. et al. Effect of Al and Pb contents on the corrosion electrochemical properties and activation of Mg–Al–Pb alloy anode // *Journal of Electrochemical Society*. 2017. Vol. 164. P. A438–A446.
17. Liu X., Liu S., Xue J. Discharge performance of the magnesium anodes with different phase constitutions for Mg-air batteries // *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 396. P. 667–674. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.085.
18. Bingjie Ma, Liuzhang Ouyang, Jie Zheng. Magnesium-rare earth intermetallic compounds for high performance high power aqueous Magnesium-Air batteries // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Is. 8. P. 1011–1025. DOI: 10.1016/j.jma.2023.06.010.
19. Wang N., Wang R., Peng C. et al. Discharge and Corrosion Performance of AP65 Magnesium Alloy in Simulated Seawater: Effect of Temperature // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23. P. 4374–4384.
20. Feng Y., Xiong W., Zhang J. et al. Electrochemical discharge performance of the Mg–Al–Pb–Ce–Y alloy as the anode for Mg–air batteries // *Journal of Materials Chemistry A*. 2016. Is. 22. P. 8658–8668.
21. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 1. Атмосферная коррозия // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94.
22. Фомина М.А., Захаров К.Е., Ямщиков Е.И., Трофимов Н.В. Подбор и исследование оптимальной рецептуры состава для локального удаления продуктов коррозии с магниевых сплавов, а также технологии его применения // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.

23. Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical methods. Fundamentals and applications*. 2ed. Wiley, 2001. 833 p.
24. Wang N., Li W., Huang Y. et al. Wrought Mg–Al–Pb–Re alloy strips as the anodes for Mg-air batteries // *Journal of power sources*. 2019. Vol. 436. P. 957–968. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226855.
25. Chen X., Ning S., Le Q. et al. Effects of external field treatment on the electrochemical behaviors and discharge performance of AZ80 anodes for Mg-air batteries // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. Vol. 38. P. 47–55.
26. Feliu S.Jr. Electrochemical impedance spectroscopy for the measurement of the corrosion rate of magnesium alloys: brief review and challenges // *Metals*. 2020. Vol. 10. No. 6. P. 775.

References

1. Kulova T.L., Skundin A.M. Problems of development of lithium-ion batteries in the world and Russia. *Elektrokhimicheskaya energetika*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 111–120.
2. Leonov A.A., Trofimov N.V. Magnesium ion batteries: prospects and challenges in the field of energy. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.
3. Morachevsky A.G., Popovich A.A. Magnesium-ion batteries – a new direction of research. *Globalnaya energiya*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 133–139.
4. Dominko R., Bitenc J., Berthelot R. et al. Magnesium batteries: Current picture and missing pieces of the puzzle. *Journal of power sources*, 2020, no. 478, pp. 321–339.
5. Li Q., Xiong W., Yu S.Y. et al. Effect of Gd content on the discharge and electrochemical behaviors of the magnesium alloy AZ31 as an anode for Mg-air battery. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 12789–12802. DOI: 10.1007/s10853-021-06135-2.
6. Li C.S., Sun Y., Gebert F., Chou S.L. Current progress on rechargeable magnesium-air battery. *Advanced Energy Materials*, 2017, vol. 7, p. 1700869. DOI: 10.1002/aenm.201700869.
7. Deng M., Wang L.Q., Hoche D. et al. Corrosion and discharge properties of Ca/Ge micro-alloyed Mg anodes for primary aqueous Mg batteries. *Corrosion Science*, 2020, vol. 177. DOI: 108958.10.1016/j.corsci.2020.108958.
8. Shi M., Li T., Shang H. et al. A critical review of inorganic cathode materials for rechargeable magnesium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 2023, no. 68, pp. 216–228.
9. Zhang T.R., Tao Z.L., Chen J. Magnesium-air batteries: from principle to application. *Materials Horizons*, 2014, vol. 1, pp. 196–206. DOI: 10.1039/c3mh00059a.
10. Ma B., Ouyang L., Zheng J. Magnesium-rare earth intermetallic compounds for high performance high power aqueous Magnesium-Air batteries. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, vol. 311, pp. 347–361. DOI: 10.1016/j.jma.2023.6.010.
11. Mana Y., Jaumaux P., Xu Y. et al. Research development on electrolytes for magnesium-ion batteries. *Science Bulletin*, 2023, no. 68, pp. 1819–1842.
12. Kablov E.N. Aviation materials science in the 21st century. Prospects and objectives. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
13. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
14. Trofimov N.V., Leonov A.A., Duyunova V.A., Uridiya Z.P. Cast magnesium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 12, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-1-1.
15. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
16. Wang L., Wang R., Feng Y. et al. Effect of Al and Pb contents on the corrosion electrochemical properties and activation of Mg–Al–Pb alloy anode. *Journal of Electrochemical Society*, 2017, vol. 164, pp. A438–A446.

17. Liu X., Liu S., Xue J. Discharge performance of the magnesium anodes with different phase constitutions for Mg-air batteries. *Journal of Power Sources*, 2018, vol. 396, pp. 667–674. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.085.
18. Bingjie Ma, Liuzhang Ouyang, Jie Zheng. Magnesium-rare earth intermetallic compounds for high performance high power aqueous Magnesium-Air batteries. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, is. 8, pp. 1011–1025. DOI: 10.1016/j.jma.2023.06.010.
19. Wang N., Wang R., Peng C. et al. Discharge and Corrosion Performance of AP65 Magnesium Alloy in Simulated Seawater: Effect of Temperature. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, pp. 4374–4384.
20. Feng Y., Xiong W., Zhang J. et al. Electrochemical discharge performance of the Mg–Al–Pb–Ce–Y alloy as the anode for Mg–air batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, is. 22, pp. 8658–8668.
21. Abramova M.G. Revisiting the confirmation of the identity of the corrosion destruction mechanism of aluminum alloys (review). Part 1. Atmospheric corrosion. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94.
22. Fomina M.A., Zakharov K.E., Yamshchikov E.I., Trofimov N.V. Selection and research of optimal paste formulation for local removal of corrosion products from magnesium alloys as well as the technology of it's application. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.
23. Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical methods. Fundamentals and applications*. 2ed. Wiley, 2001, 833 p.
24. Wang N., Li W., Huang Y. et al. Wrought Mg–Al–Pb–Re alloy strips as the anodes for Mg-air batteries. *Journal of power sources*, 2019, vol. 436, pp. 957–968. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226855.
25. Chen X., Ning S., Le Q. et al. Effects of external field treatment on the electrochemical behaviors and discharge performance of AZ80 anodes for Mg-air batteries. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, vol. 38, pp. 47–55.
26. Feliu S.Jr. Electrochemical impedance spectroscopy for the measurement of the corrosion rate of magnesium alloys: brief review and challenges. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 6, p. 775.

Информация об авторах

Леонов Александр Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Заварзин Семен Витальевич, ведущий инженер, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Трофимов Николай Вадимович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksander A. Leonov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Semen V. Zavarzin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay V. Trofimov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.05.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.05.2024.
The article was submitted 29.05.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.05.2024.