

УДК 621.357

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/30>**Бровін О.Ю.**<https://orcid.org/0000-0002-9064-1199>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Коваленко Ю.І.**<https://orcid.org/0000-0002-7523-8545>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Лещенко С.А.**<https://orcid.org/0000-0003-2918-9575>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Дерібо С.Г.**<https://orcid.org/0000-0002-1790-9857>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## ВПЛИВ ІОНІВ НІТРАТУ НА АНОДНУ ПОВЕДІНКУ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

Магній та його сплави широко використовуються як конструкційні та функціональні матеріали в аерокосмічній, автомобільній та електронній промисловості. Однак їх застосування в якості анодів в системах електрохімічного захисту та резервних джерелах живлення ускладнюється негативним диференц-ефектом, який спричиняє високі швидкості саморозчинення, що призводять до втрат металу, які сягають 70-80%. Для пом'якшення цих проблем пропонується використовувати  $\text{NaNO}_3$  як екологічно чистий інгібітор для регулювання кінетики анодного процесу. У цьому дослідженні вивчається анодна поведінка промислового сплаву МА2-1 (система Mg-Al-Zn-Mn) та експериментального сплаву МС (система Mg-Pb, 2-3% Pb) у модельних електролітах, що містять  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  та  $\text{NaNO}_3$ . Аналіз результатів потенціодинамічних і гальванодинамічних поляризаційних досліджень свідчить, що нітратні іони суттєво впливають на перебіг електрохімічних процесів в системі електрод-електроліт. Присутність іонів  $\text{NO}_3^-$  змищує потенціал анодного розчинення на 300-500 мВ у бік більш позитивних значень порівняно з чистими розчинами хлориду або сульфату, що вказує на сильне інгібування процесу розчинення. Аналіз результатів гальванодинамічних досліджень виявив три окремі стадії анодного процесу. На першій стадії відбувається різкий стрибок потенціалу через утворення  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  і дифузії іонів  $\text{NO}_3^-$  в поверхневий оксидний шар. На другій стадії відбувається зміщення потенціалу в негативний бік, спричинене оголенням поверхні та прискоренням хімічної реакції між магнієм і водою. Третя стадія характеризується стабільним позитивним зміщенням потенціалу, де іони нітрату діють як активні пасиватори, забезпечуючи рівномірне розчинення. Результати досліджень дозволяють зробити висновок, що експериментальний сплав МС демонструє нижчу швидкість розчинення та вищу стабільність поляризації порівняно зі стандартним сплавом МА2-1 у всіх протестованих розчинах. Кількісні оцінки показують, що використання хлоридно-сульфатно-нітратних розчинів-активаторів забезпечує для сплаву МС ступінь захисту 86,4-91,0%. Ці результати підтверджують, що іони нітрату ефективно пригнічують саморозчинення і здатні подовжити термін служби захисних систем на основі магнію.

**Ключові слова:** магній, інгібітор, нітрат, анодне розчинення, саморозчинення, поляризаційні дослідження



**Постановка проблеми.** Магній і його сплави мають комплекс корисних фізико-механічних властивостей, тому вони є поширеним конструкційним і функціональним матеріалом для багатьох галузей машинобудування. Їх широко використовують в космічній індустрії і авіабудуванні. Застосування таких матеріалів в кузовних деталях, двигуні та шасі автомобіля дозволяє суттєво знизити вагу і підвищити паливну ефективність транспортних засобів. З магнію і його сплавів формують корпуси та компоненти для ноутбуків і цифрових гаджетів. Вони поширені в суднобудуванні і часто використовуються у різних видах військової техніки. Вкрай важливим є застосування анодних матеріалів з магнію і його сплавів у системах електрохімічного протекторного захисту від корозії. Також ці матеріали є незамінними для багатьох конструкцій резервних хімічних джерел струму. Серед суттєвих недоліків конструкційних і функціональних матеріалів потрібно відмітити небезпеку швидкої корозії [1]. На існуючих промислових сплавах магнію з цинком, алюмінієм і марганцем під час перебігу анодного процесу спостерігається так званий негативний диференц-ефект (Negative Difference Effect, NDE) [2], який є причиною нерівномірної корозії і аномально високої швидкості саморозчинення. Цей недолік не дозволяє реалізувати енергетичний потенціал магнію і його сплавів як анодних матеріалів. NDE в хлоридних і сульфатних розчинах призводить до великих втрат металу через саморозчинення і дезінтеграцію (до 70-80%).

Для пом'якшення цих негативних ефектів потрібні нові матеріали на основі магнію, які дозволять зменшити швидкість корозії і саморозчинення з повним збереженням високої електрохімічної активності. Корозійний процес магнію складається з двох суміщених процесів: розчинення магнію і відновлення води до водню. Тому перспективним шляхом гальмування корозії є введення у склад сплавів магнію невеликої кількості інших металів, які демонструють підвищену перенапругу реакції відновлення водню, наприклад, свинцю. Не менш важливим методом обмеження швидкості анодного розчинення магнію і його сплавів в електрохімічних системах є використання інгібіторів корозії, а саме екологічно безпечного нітрату натрію  $\text{NaNO}_3$ .

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Завдяки високій теоретичній ємності та низькому стандартному електродному потенціалу магній є поширеним анодним матеріалом в системах протекторного захисту і резервних джерелах струму.

Однак його практичне використання обмежене високою швидкістю саморозчинення, зумовленого NDE. Одним з методів гальмування надмірної швидкості корозії таких анодних матеріалів є використання аніонів-інгібіторів  $\text{NO}_3^-$ .

Відомо, що іон нітрату впливає на процес виділення водню, швидкість формування захисних плівок та регулює кінетику процесу розчинення магнію.

У роботі [3] проаналізовано результати масштабного скринінгу, де нітрати є одним з найбільш високоєфективних інгібіторів. Автори використовували сучасні електрохімічні методи для оцінки впливу аніонів на швидкість корозії та анодну активність чистого магнію та його промислових сплавів AZ31, AZ91, WE43. Дослідження доводить, що нітрат-іони є одними з небагатьох сполук, здатних суттєво змінювати механізм NDE. Для хімічних джерел струму це означає можливість підвищення коефіцієнта використання металу за рахунок зниження саморозчинення під час розряду. За висновками авторів, нітрати сприяють утворенню тонких, але щільних оксидних шарів, які, на відміну від пухкого гідроксиду магнію  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , забезпечують кращий контроль анодного процесу. Для систем протекторного захисту важливою є здатність нітратів запобігати пітинговій корозії. Автори надають кількісні дані щодо ефективності, де нітрати демонструють показники понад 80% у нейтральних середовищах. Глибокий аналіз морфології поверхні після взаємодії з нітратами підтверджує перехід від локалізованого руйнування до більш рівномірного розчинення, що є ідеальним для роботи магнієвого протектора.

Автором роботи [4] детально проаналізовано електрохімію сплавів магнієвих протекторів в різних сольових розчинах, зокрема в нітратних. Нітрати рекомендуються як компоненти засипок та електролітів. Присутність нітратів запобігає пасивації магнієвих протекторів і регулює розчинення металу в агресивних ґрунтах. Також пояснено феномен NDE і механізм його гальмування аніонами  $\text{NO}_3^-$ .

Значна частина роботи [5] присвячена модифікації електролітів для повітряно-магнієвих хімічних джерел струму добавками  $\text{NaNO}_3$  і  $\text{KNO}_3$ , які визнані автором ключовими компонентами для підвищення енергоефективності. Нітрати дозволяють підвищити розрядну напругу та ємність батареї за рахунок мінімізації саморозряду анода. Встановлено, що додавання нітратів у хлоридні електроліти допомагає змінити структуру продук-

тів корозії, роблячи їх більш проникними для іонів магнію і водночас захищаючи металеву поверхню від неконтрольованого руйнування. Наведено механізм активації анода, в якому нітрати відіграють роль регулятора швидкості розчинення. Системи з електролітами, що містять нітрати, демонструють високу стабільність при низьких густинах струму. Нітратні добавки дозволяють значно подовжити термін зберігання хімічних джерел струму, що активуються водою.

В роботі [6] автори досліджували синергетичний ефект комбінації нітрату натрію та саліцилату натрію як добавок до хлоридного електроліту. Доведено, що нітрат-іони відіграють вирішальну роль у гальмуванні саморозчинення анода шляхом формування пасивної плівки. Встановлено, що нітрати змінюють баланс між анодним розчиненням магнію та виділенням водню і нітратна добавка дозволяє досягти рекордного коефіцієнта використання анода – 82% при густині струму 5 мА/см<sup>2</sup>. Експериментально підтверджено рівномірність морфології розчинення сплавів серії AZ та Mg-Ca у присутності нітратів. Також зафіксовано зменшення в 3-4 рази об'єму утвореного водню порівняно з чистим хлоридним електролітом.

У дослідженні [7] наведено результати аналізу параметрів ефективності магнієвих анодів в агресивних середовищах з вмістом нітратів. Встановлено, що пористість матеріалу та наявність нітрат-іонів мають синергетичний вплив на швидкість розчинення. В нітратних електролітах такі аноди мають більш стабільний робочий потенціал порівняно з хлоридними і сульфатними середовищами. Доведено, що нітрати сприяють утворенню більш міцного каркаса з продуктів корозії, який запобігає передчасному руйнуванню сердечника протектора.

Авторами роботи [8] досліджено одну з головних проблем магнієвих протекторів – саморозчинення та поглинання водню. Експериментально доведено, що аніони NO<sub>3</sub><sup>-</sup> зменшують поглинання водню магнієвою матрицею під час анодного розчинення. Нітрати суттєво змінюють баланс між виділенням водню та формуванням захисного оксидного шару. Встановлено, що нітрати ефективно пригнічують анодне виділення водню, обумовлене NDE, що є критично важливим для підвищення коефіцієнта корисної дії протекторів у системах захисту від корозії.

Таким чином, численними дослідженнями доведено, що нітрати можуть як гальмувати саморозчинення магнію і його сплавів, формуючи плівки Mg(OH)<sub>2</sub>/MgO, так і активувати анодний

процес розчинення металу шляхом деполяризації катодного процесу. Аніон NO<sub>3</sub><sup>-</sup> є одним з найбільш ефективних засобів для радикального зниження небажаного NDE і відповідного утворення водню. В присутності нітратів розчинення магнієвого протектора є більш рівномірним, що подовжує термін його служби в системах протекторного захисту.

Нажаль, дослідження впливу нітратів на анодні процеси на сплавах магній-свинець у літературі практично відсутні.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження швидкості анодного розчинення сплаву магнію MA2-1, який містить 3,8-5,0% Al, 0,8-1,5% Zn, 0,3-0,7% Mn, і сплаву MC, який містить Pb 2-3%, в хлоридно-сульфатних розчинах з добавкою NaNO<sub>3</sub>.

**Виклад основного матеріалу.** Анодні процеси досліджувались на сплаві магнію MA2-1, який широко використовується як матеріал анодів для протекторного захисту і експериментального сплаві MC, що є перспективним матеріалом для протекторів і електродів хімічних джерел струму.

Поведінка сплавів вивчалась за зміни швидкості розчинення електродів шляхом зміни потенціалу або густини струму, тобто потенціодинамічними і гальванодинамічними поляризаційними методами. Склади модельних розчинів, що містили Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl і NaNO<sub>3</sub> наведено в табл. 1 і вони були наближені до складів розчинів-активаторів протекторних систем і хімічних джерел струму.

Таблиця 1  
Склад модельних розчинів  
для потенціодинамічних і гальванодинамічних  
поляризаційних досліджень

Номер розчину	Компонент	Концентрація, моль/дм <sup>3</sup>
1	NaNO <sub>3</sub>	0,59
2	NaCl	0,17
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,35
	NaNO <sub>3</sub>	0,59
3	NaCl	0,17
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,41
	NaNO <sub>3</sub>	0,59

На рис. 1 наведено анодні поляризаційні залежності для сплаву MA2-1 та сплаву MC, отримані у розчині 1 (табл. 1). На рис. 2 наведено поляризаційні залежності у хлоридно-сульфатно-нітратних сумішах з різним вмістом сульфату (розчини 2 і 3, табл. 1). Дія розчину NaNO<sub>3</sub> проявляється у зміщенні анодного потенціалу (E<sub>a</sub>) у бік вищих пози-

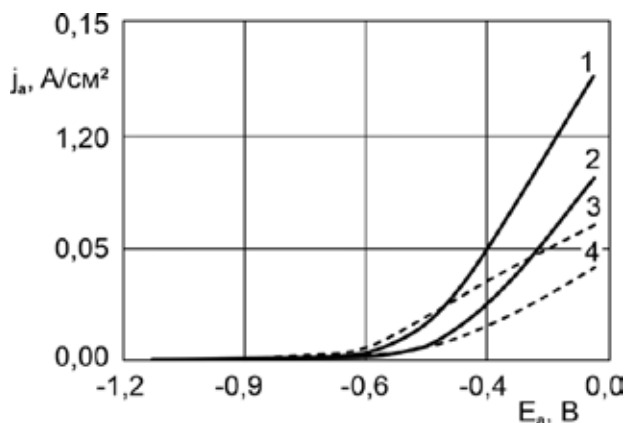


Рис. 1. Анодні поляризаційні залежності для сплаву МА2-1 (1, 2) і сплаву МС (3, 4) в розчині 1 (табл. 1) при швидкості зміни потенціалу, В/с: 1, 3 –  $1 \cdot 10^{-2}$ ; 2, 4 –  $5 \cdot 10^{-2}$

тивних значень. Присутність іона  $\text{NO}_3^-$  зміщує поляризацію на 300 – 500 мВ в бік позитивних значень порівняно з розчинами  $\text{NaCl}$  і  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Хід поляризаційних залежностей характеризується зміщенням потенціалу від стаціонарного в бік позитивних значень з деяким збільшенням швидкості процесу при  $E_a > -0,3$  В (рис. 1),  $E_a > -0,7 \div -0,45$  В (рис. 2а),  $E_a > -0,8 \div -0,5$  (рис. 2б).

Для електроду зі сплаву МС відзначається більша поляризація у всіх трьох розчинах при різних швидкостях зміни потенціалу. У разі збільшення швидкості зміни потенціалу швидкість анодного процесу зменшується. Це можна пояснити більшою швидкістю доставки аніонів до поверхні електрода, що призводить до пришвидшеного блокування поверхні іонами  $\text{NO}_3^-$ . При збільшенні концентрації іона сульфату у розчині 3 збільшення швидкості розчинення відбувається за більш негативних потенціалів.

На рис. 3 – 5 наведено анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 та магнієвого сплаву МС у нітратному розчині 1 та хлоридно-сульфатно-нітратних сумішах (розчинах 2 і 3). Зміна густини струму відбувалась в межах від 0 до  $0,05$  А/см<sup>2</sup>. На отриманих графічних залежностях потенціалу від густини струму можна виділити три ділянки.

У нітратному розчині 1 на рис. 3 на першій ділянці спостерігається різке зміщення (стрибок) потенціалу до позитивних значень, яке для швидкостей зміни струму  $v = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$  та  $1 \cdot 10^{-2}$  А/с на сплаві МА2-1 відповідно становить 0,65; 0,9; 1,09; 1,31 В (рис 3а).

Для сплаву МС (рис. 3б) стрибки потенціалів виражені меншою мірою і становлять 0,48; 0,61; 0,7; 1,22 В для  $v = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$  та  $1 \cdot 10^{-2}$  А/с, відповідно. Зі зростанням швидкості зміни струму максимальне значення потенціалу змінюється в бік позитивних значень. Ймовірно, на цій ділянці відбувається утворення гідроксиду магнію, а іони  $\text{NO}_3^-$ , які мають високу проникну здатністю, дифундують в поверхневий оксидний шар. В результаті в приелектродному шарі за умов анодної поляризації накопичуються іони магнію з утворенням нітрату і гідроксиду магнію. Відмінність у стрибках потенціалу пояснюється тим, що шар утвореного  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  на сплаві МС є більш стійким і складніше руйнується в порівнянні з шаром на сплаві МА2-1. На другій ділянці поляризаційних залежностей спостерігається зміщення потенціалу електрода в негативну сторону до значень  $-0,8 \div -0,35$  В для сплаву МА2-1 і  $-0,8 \div -0,15$  В для сплаву МС в залежності від швидкості зміни струму. На цій ділянці відбувається оголення поверхні електрода, що прискорює

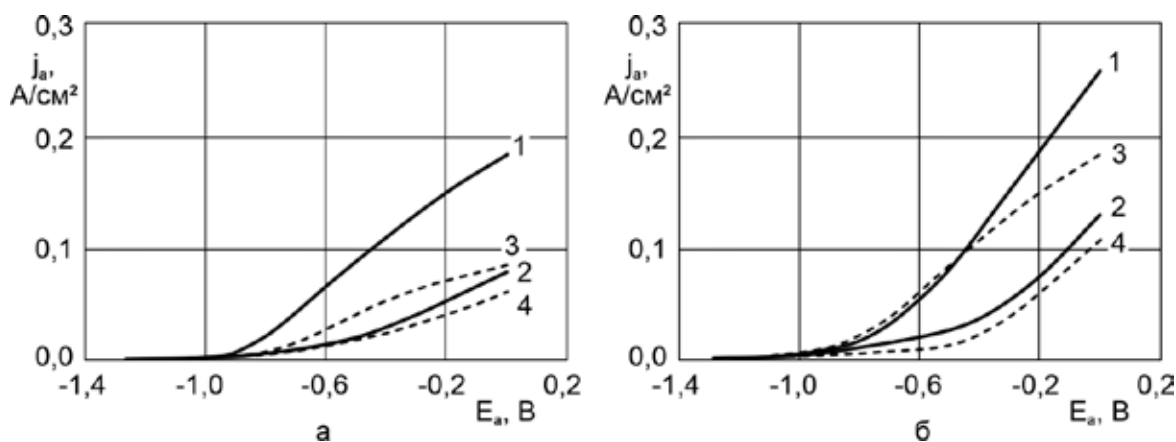


Рис. 2. Анодні поляризаційні залежності для сплаву МА2-1 (1, 2) і сплаву МС (3, 4) в розчині 2 (а) і розчині 3 (б) при швидкості зміни потенціалу, В/с: 1, 3 –  $1 \cdot 10^{-2}$ ; 2, 4 –  $5 \cdot 10^{-2}$

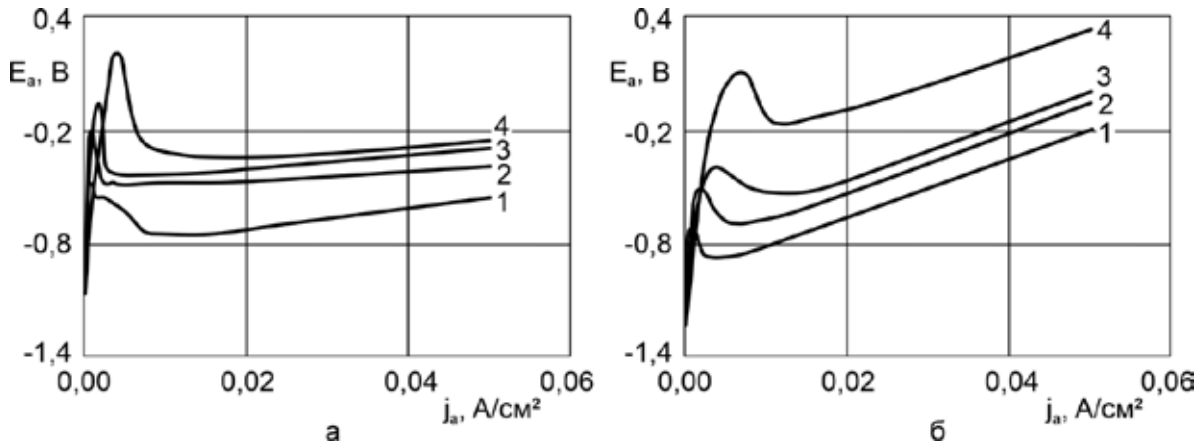


Рис. 3. Анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 (а) і сплаву МС (б) в розчині 1 при швидкості зміни потенціалу, А/с: 1 –  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-2}$

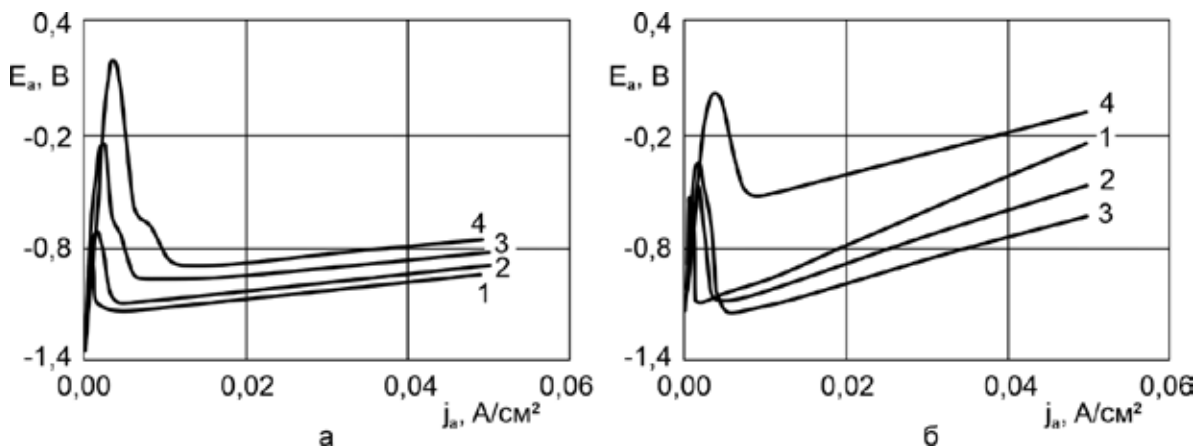


Рис. 4. Анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 (а) і сплаву МС (б) в розчині 2 при швидкості зміни потенціалу, А/с: 1 –  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-2}$

хімічну реакцію магнію з водою. Більш пологий хід залежностей на сплаві МС (рис. 3б) і зміщення потенціалу до менш негативних значень свідчить про більш повільне оголення поверхні. Третя ділянка гальванодинамічних залежностей характеризується рівномірним зміщенням потенціалу в бік більш позитивних значень. Для сплаву МС потрібно відзначити більший нахил залежностей порівняно зі сплавом МА2-1.

На рис. 4 наведено анодні гальванодинамічні залежності для сплавів магнію в хлоридно-сульфатно-нітратному розчині 2.

На першій ділянці стрибки потенціалів становлять 0,32; 0,55; 0,9; 1,27 В для сплаву МА2-1 (рис. 4а) і 0,65; 0,75; 0,83; 1,22 В для сплаву МС (рис. 4б) при  $v = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$  та  $1 \cdot 10^{-2}$  А/с відповідно. На цій ділянці відбувається утворення  $Mg(OH)_2$ , а також адсорбція іонів  $Cl^-$  та  $SO_4^{2-}$  з витісненням поверхневого оксиду. Іони  $NO_3^-$  дифундують у поверхневий шар, створюючи

захисну плівку. Під час видалення з поверхні електрода поверхневого оксиду і іонів  $OH^-$  на графіках спостерігається зміщення потенціалу в негативний бік до величин  $-1,1 \div -0,95$  В для сплаву МА2-1 і  $-1,1 \div -0,55$  В для сплаву МС в залежності від швидкості зміни струму. Друга ділянка залежностей характеризується більш пологим зміщенням потенціалу в негативний бік для обох магнієвих сплавів порівняно з залежностями для хлоридно-сульфатних електролітів, що пояснюється повільнішим руйнуванням поверхневого захисного шару через присутність у розчині  $NO_3^-$ . Третя ділянка графіків характеризується меншим нахилом у порівнянні з залежностями для хлоридно-сульфатних розчинів як для сплаву МА2-1, так і для сплаву МС. Це пояснюється активною дією іонів-пасиваторів  $NO_3^-$ .

При збільшенні концентрації сульфату (розчин 3, табл. 1) на рис. 5 зміщення потенціалу на першій ділянці відбувається до менш позитивних значень проти графіків на рис. 4.

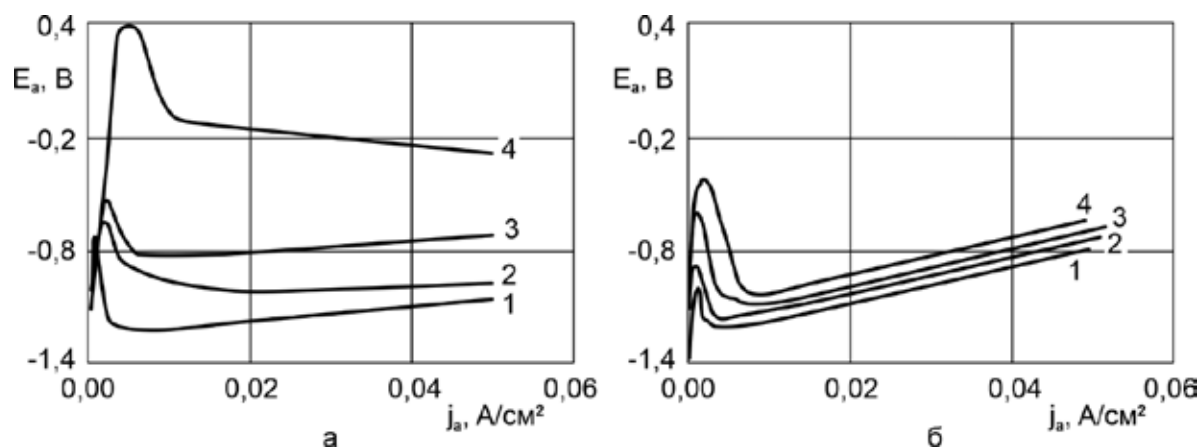


Рис. 5. Анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 (а) і сплаву МС (б) в розчині 3 при швидкості зміни потенціалу, А/с: 1 –  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-2}$

Відповідні стрибки потенціалів становлять 0,6; 0,65; 0,75; 1,7 В для сплаву МА2-1 (рис. 5а) і 0,37; 0,44; 0,72; 0,85 В для сплаву МС (рис. 5б).

Аналіз гальванодинамічних залежностей свідчить, що у присутності нітратних іонів перебіг анодного процесу для сплавів магнію відбувається при більш позитивних потенціалах на всіх трьох ділянках залежностей у порівнянні з хлоридно-сульфатними розчинами.

Для оцінки ефективності нітратного інгібітору було проведено гравіметричне дослідження швидкості розчинення сплаву МС в двох модельних розчинах складу  $\text{NaCl} - 0,17$  моль/дм<sup>3</sup>,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 0,35$  моль/дм<sup>3</sup> з додавання  $\text{NaNO}_3$  у кількості 0,59 моль/дм<sup>3</sup> і без додавання  $\text{NaNO}_3$ . На підставі результатів гравіметричних досліджень було розраховано ступінь захисту  $Z$  (%), який є кількісною характеристикою ефективності інгібітору корозії, що показує, наскільки присутність інгібітору знижує швидкість розчинення сплаву. Розрахунок відбувався за формулою:

$$Z = 100 \cdot (V_0 - V_i) / V_0 \quad (1)$$

де  $V_0$  – швидкість корозії без інгібітору, г/(м<sup>2</sup>·год);  $V_i$  – швидкість корозії з інгібітором, г/(м<sup>2</sup>·год).

Результати розрахунку свідчать, що ступінь захисту нітратного інгібітору в таких умовах становить 86,4 – 91,0 %.

**Висновки.** Вивчено анодну поведінку сплавів магнію МА2-1 і МС у розчині  $\text{NaNO}_3$  та хлоридно-сульфатно-нітратних розчинах-активаторах з різним вмістом сульфату. Результатами поляризаційних досліджень доведено, що швидкість розчинення сплаву МС менша порівняно зі сплавом МА2-1 у всіх використаних розчинах. В присутності іону нітрату потенціал перебігу анодних процесів суттєво зміщується в бік більш позитивних значень, що призводить до значного гальмування розчинення. Розрахунок ступеня захисту нітратного інгібітору у хлоридно-сульфатно-нітратних розчинах на сплаві МС показав, що у присутності іону нітрату швидкість корозії знижується на 86,4 – 91,0 %.

#### Список літератури:

1. Wei L., Gao Z. Recent research advances on corrosion mechanism and protection, and novel coating materials of magnesium alloys: a review. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, no. 12. P. 8427–8463. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2ra07829e>
2. Anodic dissolution dictates the negative difference effect (NDE) of magnesium corrosion more in chemical pathway / W. Zhang et al. *Materials Letters*. 2018. Vol. 232. P. 54–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.069>
3. Comprehensive screening of Mg corrosion inhibitors / S. V. Lamaka et al. *Corrosion science*. 2017. Vol. 128. P. 224–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.07.011>
4. Song G.-L. Corrosion of magnesium alloys. Woodhead Publishing Limited, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857091413>
5. Recent progress on flexible zn-air batteries / Y. Zhang et al. *Energy storage materials*. 2021. Vol. 35. P. 538–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.09.008>
6. Synergistic mixture of electrolyte additives: a route to a high-efficiency mg-air battery / D. Snihirova et al. *The journal of physical chemistry letters*. 2020. Vol. 11, no. 20. P. 8790–8798. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c02174>

7. Performance assessment of magnesium anodes manufactured by sintering process / J. A. Sanmiguel-May et al. *Metals*. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 406. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030406>

8. Nazarov A., Yurasova T., Marshakov A. Hydrogen absorption and self-corrosion of mg anode: influence of aqueous electrolyte species. *Corrosion and materials degradation*. 2024. Vol. 5, no. 3. P. 350–369. DOI: <https://doi.org/10.3390/cmd5030015>

### **Brovin O.Yu, Kovalenko Yu.I., Leshchenko S.A, Deribo S.G. INFLUENCE OF NITRATE IONS ON THE ANODIC BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOYS**

*Magnesium and its alloys are widely utilized as structural and functional materials in aerospace, automotive, and electronic industries due to their high energy efficiency and low density. However, their application as anodes in electrochemical protection systems and reserve power sources is hindered by the Negative Difference Effect, which causes high self-dissolution rates, leading to metal losses of up to 70-80%. To mitigate these issues, the use of  $\text{NaNO}_3$  as an environmentally friendly inhibitor is proposed to regulate the kinetics of the anodic process. This study investigates the anodic behavior of the industrial MA2-1 alloy (Mg-Al-Zn-Mn system) and the experimental MC alloy (Mg-Pb system, 2-3% Pb) in model electrolytes containing  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , NaCl, and  $\text{NaNO}_3$ . Using potentiodynamic and galvanodynamic polarization methods, the research demonstrates that nitrate ions significantly modify the electrode/electrolyte interface. The presence of  $\text{NO}_3^-$  ions shifts the anodic dissolution potential by 300-500 mV toward more positive values compared to pure chloride or sulfate solutions, indicating strong inhibition of the dissolution process. The galvanodynamic analysis revealed three distinct stages of the anodic process. In the first stage, a sharp potential jump occurs due to the formation of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and the diffusion of  $\text{NO}_3^-$  ions into the surface oxide layer. The second stage involves a negative potential shift caused by surface exposure and the acceleration of the chemical reaction between magnesium and water. The third stage is characterized by a steady positive shift, where nitrate ions act as active passivators, ensuring uniform dissolution. The study concludes that the experimental MC alloy exhibits a lower dissolution rate and higher polarization stability compared to the standard MA2-1 alloy across all tested solutions. Quantitative estimates show that the use of chloride-sulfate-nitrate solutions provides a protection degree of 86.4-91,0% for the MC alloy. These findings confirm that nitrate ions effectively suppress Negative Difference Effect, thereby extending the service life of magnesium-based protection systems.*

**Keywords:** magnesium, inhibitor, nitrate, anodic dissolution, self-dissolution, polarization studies.

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026