

ІНГІБУВАННЯ КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д16Т КОМПОЗИЦІЄЮ НАТРІЮ АЛЬГІНАТУ ТА ЦИНКУ АЦЕТАТУ В НЕЙТРАЛЬНОМУ ХЛОРИДОВІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

С. А. КОРНІЙ¹, І. М. ЗІНЬ^{1,2}, О. П. ХЛОПІК¹, Н. Й. СОБОДОШ¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Вивчали вплив екологічно безпечної інгібувальної композиції на основі полісахариду (натрію альгінату) та солі ацетатної кислоти (цинку ацетату) на корозію алюмінієвого сплаву у нейтральному хлоридовмісному середовищі. На підставі електрохімічних досліджень встановлено протикорозійну ефективність композиції та особливості механізму її захисної дії. Ступінь захисту металу альгінат-ацетатною композицією, розрахований за поляризаційними залежностями, становив 89...98%. Протикорозійний ефект композиції пояснено утворенням захисної плівки на поверхні сплаву внаслідок адсорбції альгінату, осадження цинку на катодних ділянках металу та, ймовірно, утворенням малорозчинних Al^{3+} - Zn^{2+} -альгінатних комплексів. Формування захисної плівки на поверхні сплаву в інгібованих розчинах підтверджено результатами електрохімічної імпедансної спектроскопії, сканівної електронної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, корозія, хлоридовмісне середовище, інгібувальна композиція, натрій альгінат, цинк ацетат, протикорозійна ефективність.

The effect of an environmentally safe inhibitory composition based on polysaccharide (sodium alginate) and acetic acid salt (zinc acetate) on the corrosion of aluminum alloy in a neutral chloride-containing environment was studied. Based on electrochemical studies, the anticorrosion efficiency of the composition and the peculiarities of the mechanism of its protective action were established. The degree of metal protection by the alginate-acetate composition, calculated according to polarization dependences, was 89...98%. The anticorrosion effect of the composition is explained by the formation of a protective film on the surface of the alloy due to the adsorption of alginate, the deposition of zinc hydroxides on the cathode areas of the metal and, probably, the formation of poorly soluble Al^{3+} - Zn^{2+} -alginate complexes. The formation of the protective film on the surface of the alloy in inhibited solutions was confirmed by the results of electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, and Energy-dispersive X-ray analysis.

Keywords: aluminum alloy, corrosion, chloride-containing environment, inhibitory composition, sodium alginate, zinc acetate, anticorrosion performance.

Вступ. Сплави алюмінію є міцними, відносно м'якими, легкими, ковкими та пластичними матеріалами. Їх широко застосовують в аерокосмічній та автомобільній галузях промисловості, у суднобудуванні та будівництві. Однак через інтерметалічну зміцнювальну фазу алюмінієві сплави схильні до локальної корозії [1]. Одним із найпростіших, технологічних та ефективних способів гальмування корозії алюмінієвих сплавів є використання інгібіторного захисту [1–3]. На сьогодні для цього використовують синтетичні інгібітори, які містять шкідливі для навколишнього середовища та людини речовини. Тому створення інгібіторів корозії

на основі екологічно безпечних продуктів рослинного походження є актуальним завданням. Ефективними компонентами інгібіторів є природні полімери (полісахариди), переваги яких дешевизна та відновлювальна сировина [4–7].

Натрій альгінат – природний полісахарид, молекули якого побудовані зі залишків β -D-мануранової і α -L-гулуранової кислот, які знаходяться в піранозній формі та пов'язані в лінійні ланцюги глікозидними зв'язками. У карбоксильних групах водень заміщений натрієм. Інгібування корозії металу натрієм альгінатом пов'язано з наявністю у його структурі великої кількості гідроксильних (–OH) і карбоксильних (–COOH) груп з неподіленою парою електронів у кожній із них [8]. Через ці групи натрій альгінат взаємодіє з металевими поверхнями, утворюючи шар корозійностійкої органічної плівки. Система альгінатний фрагмент–метал є стабільною, а адсорбція відбувається спонтанно [9]. Максимальна ефективність інгібування корозії металу альгінатним полімером є в межах 70...80% [10]. Цей біополімер не забезпечує прийнятної інгібувальної ефективності для алюмінієвого сплаву у нейтральних хлоридних розчинах, однак його інгібувальну ефективність можна підвищити додаванням співсинергістів [7, 11].

Нещодавні дослідження показали, що поєднання органічних і неорганічних інгібіторів може бути корисним для отримання високого ступеня захисту для металів у сольових розчинах [12, 13]. Для підсилення захисної дії інгібіторів корозії використовують солі карбонових кислот [14]. Зокрема, згідно з працею [15], здатність екстракту листя *Urtica Dioica* до зниження швидкості корозії вуглецевої сталі в хлоридному розчині може бути помітно посилена додаванням цинку ацетату. Встановлено [16], що екологічно чиста композиція на основі цинку ацетату та природного полісахариду (гуміарабіку) має високу ефективність у пригніченні корозії низьколегованої вуглецевої сталі в нейтральному середовищі.

Мета роботи – дослідити ефективність захисту алюмінієвого сплаву від корозії у нейтральному хлоридовмісному середовищі композицією на основі натрію альгінату та цинку ацетату.

Матеріали та методики експерименту. Для досліджень використовували зразки алюмінієвого сплаву Д16Т з таким хімічним складом (wt%): 90,8...94,7 Al, 3,8...4,9 Cu, 1,2...1,8 Mg, 0,3...0,9 Mn, 0,5 Si, до 0,5 Fe, до 0,3 Zn. Корозивним середовищем слугував 0,1%-ий розчин NaCl, в який додавали як інгібітори корозії природний полісахарид – натрій альгінат (структурна формула $(C_6H_7O_6Na)_n$) та цинк ацетат $((CH_3COO)_2Zn)$. Для інгібування середовища використовували ці сполуки як окремо, так і їх композиції зі сталюю сумарною концентрацією 2 г/л. Досліджували за кімнатної температури без перемішування. Натрій альгінат та цинк ацетат придбані в ТЗОВ “Сфера Сім”.

Електрохімічну поведінку зразків алюмінієвого сплаву у корозивному та інгібованих розчинах досліджували методом потенціодинамічної поляризації, використовуючи потенціостат/гальваностат VersaStat 3 (AMETEK Scientific Instruments), насичений електрод порівняння Ag/AgCl та допоміжний платиновий електрод. Швидкість сканування потенціалу становила 2 mV/s. Робоча площа зразка алюмінієвого сплаву 1 cm². Зразки перед зануренням у корозивне середовище обробляли шліфувальним папером марок P320 та P600 і знежирювали ацетоном. Струм корозії визначали з поляризаційних кривих графо-аналітичним методом.

Ефективність інгібіторів корозії визначали за формулою

$$\eta = 100\% \cdot (i_1 - i_2) / i_1,$$

де i_1 та i_2 – швидкість корозії відповідно в неінгібованому та в інгібованому розчинах, mA/cm².

Імпедансні спектри алюмінієвого сплаву знімали за потенціалу вільної корозії у діапазоні частот 10000...0,01 Hz. Амплітуда прикладеного сигналу становила 10 mV. Для розрахунку імпедансних характеристик алюмінієвого сплаву в контроль-

ному та інгібованих розчинах використовували програму EIS Spectrum Analyser.

Морфологію та елементний склад поверхні зразка алюмінієвого сплаву після його витримання у використовуваних розчинах упродовж 168 h вивчали на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP зі системою енергодисперсійного мікроаналізу INCA Energy 350. Візуально зразки після корозійних випробувань оглядали за допомогою USB-мікроскопа Kropos за збільшення у 10 разів.

Результати та обговорення. Поляризаційні криві сплаву після 24; 48 та 168 h витримки у 0,1% розчині NaCl з додаванням натрію альгінату, цинку ацетату та їх композиції наведено на рис. 1. Встановлено, що у всіх розчинах переважає змішаний катодно-анодний контроль корозії металу.

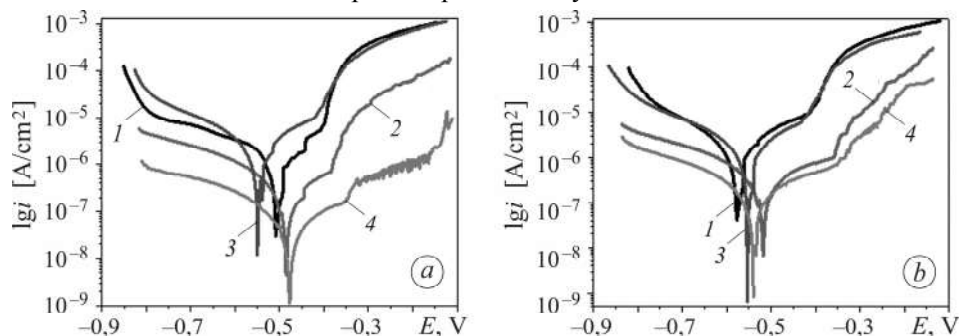
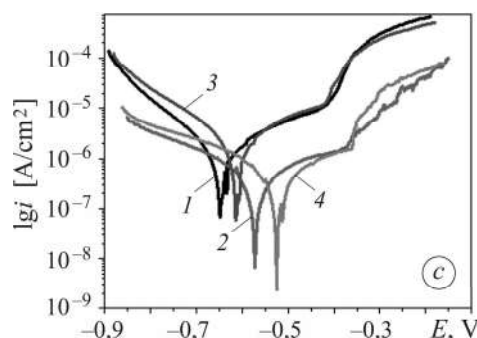


Рис. 1. Поляризаційні криві сплаву після 24 h (a), 48 h (b), 168 h (c) експозицій у 0,1%-му розчині NaCl з додаванням інгібітора: 1 – неінгібоване середовище; 2 – 2 g/l цинку ацетату; 3 – 2 g/l натрію альгінату; 4 – по 1 g/l натрію альгінату та цинку ацетату.

Fig. 1. Polarization curves of the alloy after 24 h (a), 48 h (b), 168 h (c) exposure to a 0.1% NaCl solution with the addition of an inhibitor: 1 – uninhibited solution; 2 – 2 g/l zinc acetate; 3 – 2 g/l of sodium alginate; 4 – 1 g/l of sodium alginate and zinc acetate each.



Таблиця 1. Електрохімічні характеристики сплаву Д16Т після експозиції у контрольному та інгібованих розчинах

Експозиція, h Середовище	24			48			168		
	$E_{\text{сопг}},$ V	$i_{\text{сопг}},$ A/cm ²	$\eta,$ %	$E_{\text{сопг}},$ V	$i_{\text{сопг}},$ A/cm ²	$\eta,$ %	$E_{\text{сопг}},$ V	$i_{\text{сопг}},$ A/cm ²	$\eta,$ %
0,1%-ий розчин NaCl	-0,5	$1,8 \cdot 10^{-6}$	–	-0,57	$1,6 \cdot 10^{-6}$	–	-0,64	$2,3 \cdot 10^{-6}$	–
2 g/l (CH ₃ COO) ₂ Zn	-0,48	$5,9 \cdot 10^{-7}$	68	-0,51	$4,2 \cdot 10^{-7}$	75	-0,57	$4,0 \cdot 10^{-7}$	83
2 g/l (C ₆ H ₇ O ₆ Na) _n	-0,54	$1,4 \cdot 10^{-6}$	24	-0,55	$1,2 \cdot 10^{-6}$	25	-0,61	$2,1 \cdot 10^{-6}$	10
1 g/l (CH ₃ COO) ₂ Zn 1 g/l (C ₆ H ₇ O ₆ Na) _n	-0,47	$4,6 \cdot 10^{-8}$	98	-0,54	$1,6 \cdot 10^{-7}$	90	-0,52	$2,7 \cdot 10^{-7}$	89

У хлоридному розчині та за окремого використання натрію альгінату спостерігали найвищі значення катодних та анодних струмів корозії металу. Дещо більшу ефективність інгібування сплаву виявлено за окремого використання цинку ацетату. Однак за інгібування корозивного розчину композицією густина струму корозії сплаву найнижча (рис. 1, табл. 1), при цьому потенціал корозії сплаву зміщувався у бік позитивних значень. Така її захисна дія зберігається впродовж тривалої витримки. Так, після 168 h експозиції $i_{\text{кор}} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, що на один порядок менше порівняно з контрольним розчином. За додавання композиції натрію альгінату ($\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6\text{Na}$)_n та цинку ацетату (CH_3COO)₂Zn значення струмів зменшуються (табл. 1). При цьому захисна ефективність композиції стосовно корозії алюмінієвого сплаву в хлоридовмісному розчині є в межах 89...98%.

Імпедансні залежності (рис. 2) підтверджують високі протикорозійні характеристики композиції порівняно з неінгібованим середовищем. Так, модуль імпедансу алюмінієвого сплаву за частоти змінного струму 0,1 Hz в інгібованому композицією розчині після 3 та 24 h становить $3,7 \cdot 10^5$ та $2,8 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, відповідно. Менш виражений інгібувальний ефект спостерігали за окремого використання цинку ацетату, тут параметр $Z_{0,1}$ є в межах $8,5 \cdot 10^4$ та $6,9 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, відповідно. Використання натрію альгінату як самостійного інгібітора корозії не забезпечує надійного захисту металу, при цьому його модуль імпедансу найнижчий та є практично на одному рівні із контрольним розчином.

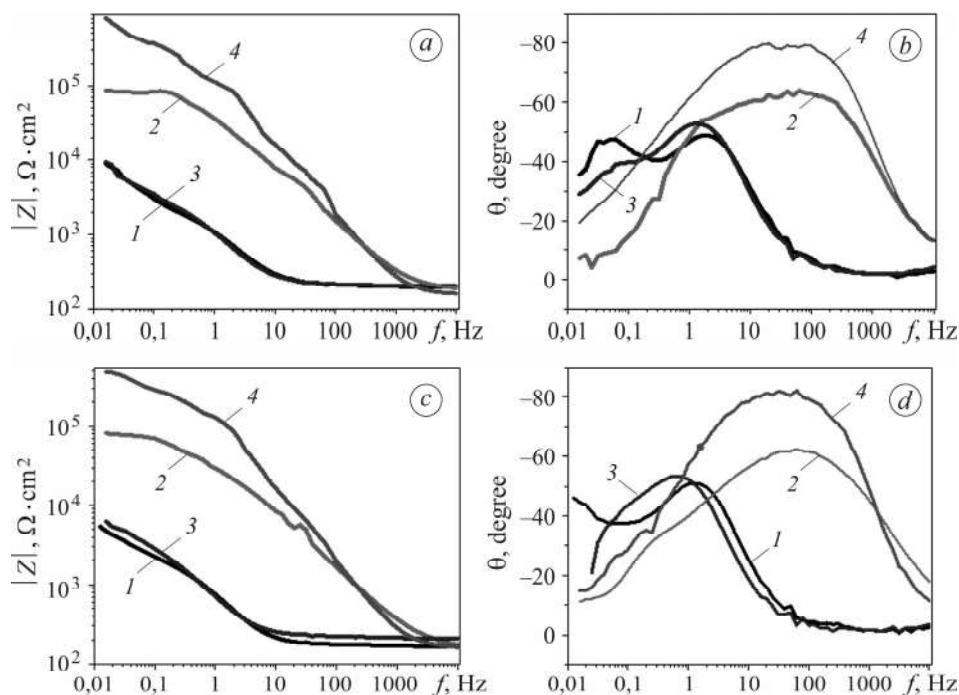


Рис. 2. Частотні залежності модуля імпедансу та фазового кута для сплаву Д16Т після 3 h (a, b) та 24 h (c, d) експозиції у 0,1%-му розчині NaCl з додаванням інгібітора: 1 – неінгібоване середовище; 2 – 2 g/l цинку ацетату; 3 – 2 g/l натрію альгінату; 4 – по 1 g/l натрію альгінату та цинку ацетату.

Fig. 2. Frequency dependences of the impedance modulus and the phase angle for D16T alloy after 3 h (a, b) and 24 h (c, d) exposure to a 0.1% NaCl solution with the addition of an inhibitor: 1 – uninhibited solution; 2 – 2 g/l of zinc acetate; 3 – 2 g/l of sodium alginate; 4 – 1 g/l of sodium alginate and zinc acetate each.

За присутності композиції цинку ацетату та натрію альгінату пік фазового кута алюмінієвого сплаву зміщується в бік вищих частот змінного струму та збільшується його максимум до 80° , що вказує на формування на поверхні металу стійкої захисної плівки.

Імпедансні спектри алюмінієвого сплаву (рис. 2), записані після 3 та 24 h витримки у корозивному та інгібованих розчинах, моделювали за допомогою електричного еквівалентного кола (рис. 3) та програми EIS Spectrum Analyser.

Рис. 3. Еквівалентна електрична схема, яка моделює корозію алюмінієвого сплаву: R_s – опір корозивного середовища; Q_f – ємність захисної поверхневої плівки на сплав, виражена через елемент сталої фази; R_f – опір електролітичного середовища в порах захисної плівки; Q_{dl} – ємність електричного подвійного шару на металі, виражена через елемент сталої фази; R_{ct} – опір переносу заряду металу.

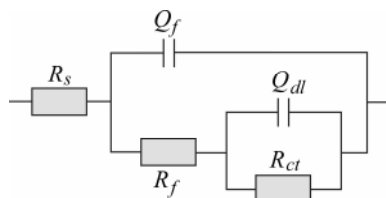


Fig. 3. Equivalent electrical circuit simulating the aluminum alloy corrosion: R_s is the resistance of the corrosion solution; Q_f is the capacitance of the protective surface film on the alloy, expressed through the constant phase element; R_f is the resistance of the electrolytic solution in the pores of the protective film; Q_{dl} is the capacitance of the electric double layer on metal, expressed through the constant phase element; R_{ct} is the resistance of metal charge transfer.

Як бачимо (табл. 2), максимальний опір переносу заряду R_{ct} є на зразках алюмінієвого сплаву, витриманого в корозивному розчині з додаванням композиції на основі альгінату та ацетату. Тут параметр R_{ct} після 3 та 24 h експозицій становить $5,39 \cdot 10^5$ та $3,02 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, відповідно, що на порядок (після 3 h) та на два порядки (24 h) перевищує значення опору переносу заряду алюмінієвого сплаву, витриманого в корозивному розчині. При цьому провідність Y_0 елемента сталої фази Q_{dl} дорівнює $3,72 \cdot 10^{-6}$ та $8,99 \cdot 10^{-6} \text{ s}^n/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$, відповідно, що пов'язано з формуванням на поверхні металу захисної плівки. Водночас зниження провідності Y_0 елемента сталої фази Q_{dl} металу може свідчити про локальне руйнування алюмінієвого сплаву в хлоридному розчині.

Таблиця 2. Характеристики еквівалентного електричного кола (рис. 3), розраховані на основі імпедансних спектрів алюмінієвого сплаву в контрольному та інгібованих розчинах

№ кривої на рис. 2	R_{ct} , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q_{dl}(Y_0)$, $\text{s}^n/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}(n)$	R_f , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q_f(Y_0)$, $\text{s}^n/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f(n)$
3 h витримки						
1	$1,01 \cdot 10^4$	$6,38 \cdot 10^{-4}$	0,96	$2,65 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	0,84
2	$6,66 \cdot 10^4$	$2,73 \cdot 10^{-6}$	0,92	$2,12 \cdot 10^4$	$3,02 \cdot 10^{-6}$	0,83
3	$6,95 \cdot 10^3$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	0,96	$3,77 \cdot 10^3$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	0,85
4	$5,39 \cdot 10^5$	$3,72 \cdot 10^{-6}$	0,7	$1,59 \cdot 10^5$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	0,96
24 h витримки						
1	$8,9 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	0,76	$2,11 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,87
2	$5,78 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	0,72	$3,34 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	0,76
3	$6,77 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,51	$2,25 \cdot 10^3$	$3,09 \cdot 10^{-4}$	0,86
4	$3,02 \cdot 10^5$	$8,99 \cdot 10^{-6}$	0,82	$2,26 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	0,95

За результатами електродхімічної імпедансної спектроскопії інгібувальна ефективність η досліджуваної композиції на алюмінієвому сплаві в 0,1%-му розчині натрію хлориду для обох витримок (3 та 24 h) є найвищою. При цьому опір переносу заряду металу R_{ct} зростає в 50 (для 3 h) та в 30 (24 h) разів.

Після 168 h витримки сплаву у корозивних середовищах досліджено його морфологію поверхні та хімічний склад. Показано, що поверхня сплаву після експозиції в хлоридному середовищі повністю вкрита продуктами корозії, ймовірно алюмінію оксидами та гідроксидами (рис. 4a). На певних ділянках виявлено хлор (табл. 3). За вмісту 2 g/l натрію альгінату на поверхні також присутні продукти корозії та пітинги, зосереджені навколо інтерметалідних фаз, що вказує на недостатній захист металу (рис. 4c). Додавання до середовища цинку ацетату сприяє утворенню на поверхні алюмінієвого сплаву цинку гідроксидів (рис. 4b). Схожі результати отримані у працях [15, 16].

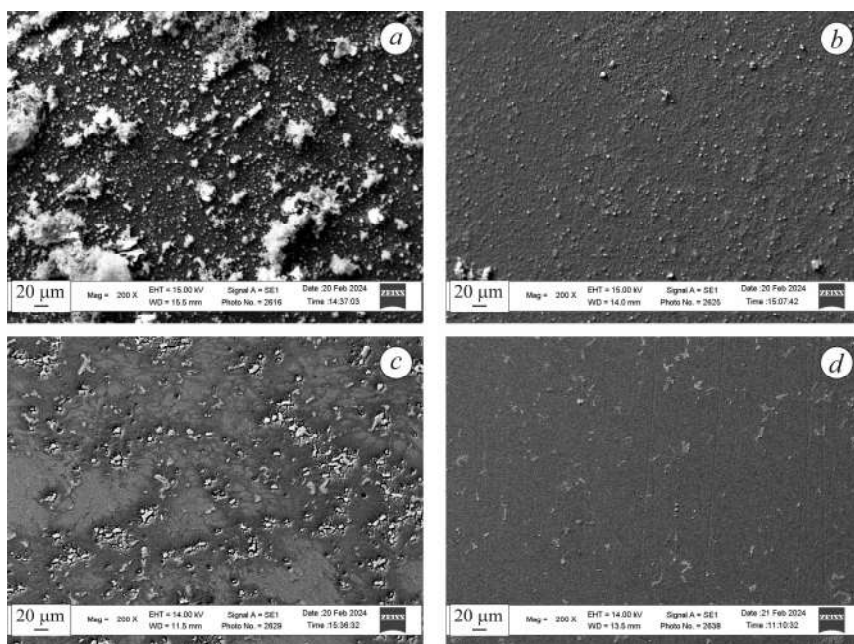


Рис. 4. Електронно-мікроскопічне зображення поверхні сплаву Д16Т після 168 h експозиції у 0,1%-му розчині NaCl: а – неінгібоване середовище; б – 2 g/l цинку ацетату; с – 2 g/l натрію альгінату; d – по 1 g/l натрію альгінату та цинку ацетату.

Fig. 4. Electron microscopic image of D16T alloy surface after 168 h of exposure to a 0.1% NaCl solution: a – uninhibited environment; b – 2 g/l of zinc acetate; c – 2 g/l of sodium alginate; d – 1 g/l of sodium alginate and zinc acetate each.

Згідно з результатами сканівної електронної мікроскопії, захисний ефект найвираженіший у корозивному середовищі синергічної композиції альгінату та ацетату в еквівалентних кількостях по 1 g/l (рис. 4d). Тут спостерігали однорідну плівку на поверхні за повної відсутності продуктів корозії. Методом енергодисперсійного мікроаналізу на поверхні зразка сплаву, витриманого в інгібованому синергічною композицією 0,1%-му розчині NaCl, виявлено зменшення вмісту кисню до 2,07 wt% (табл. 3). За відсутності інгібітора в корозивному середовищі вміст кисню на сплаві становив 35,8% через формування товстої і неоднорідної плівки продуктів корозії, яка складалась з алюмінію оксидів та гідроксидів (рис. 4a). Водночас в інгібованому композицією середовищі зростає вміст вуглецю на поверхні сплаву до 3,6 wt%. Таким чином, результати енерго-

дисперсійного мікроаналізу свідчать про формування на поверхні сплаву в інгібованому корозивному середовищі органічної адсорбційної плівки.

Таблиця 3. Хімічний склад поверхні сплаву Д16Т після 168 h експозиції у 0,1%-му розчині NaCl за різної концентрації натрію альгінату та цинку ацетату

Концентрація, g/l	Вміст, wt%										
	Al	C	O	Si	Cl	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg	Na
0,1% NaCl	19,83	2,35	35,8	0,47	0,31	5,51	30,44	4,59	0,71	–	–
2 g/l (CH ₃ COO) ₂ Zn	72,16	5,39	6,71	–	–	1,62	6,99	4,62	1,38	1,13	–
2 g/l (C ₆ H ₇ O ₆ Na) _n	16,76	6,76	30,10	1,03	–	–	–	–	0,39	1,08	2,61
1 g/l (CH ₃ COO) ₂ Zn 1 g/l (C ₆ H ₇ O ₆ Na) _n	87,53	3,6	2,07	–	–	–	5,01	0,42	1,37	–	–

У неінгібованому корозивному середовищі (рис. 5a) та з додаванням до нього натрію альгінату (рис. 5c) на поверхні зразків за допомогою USB-мікроскопа виявили інтенсивне локальне руйнування із нагромадженням біло-сірих продуктів корозії. За додавання до корозивного розчину 2 g/l цинку ацетату поверхня сплаву набула матового відтінку (рис. 5b), тоді як за інгібування розчину композицією натрію альгінату та цинку ацетату сплав зберігав гладку поверхню з типовим металевим блиском (рис. 5d).

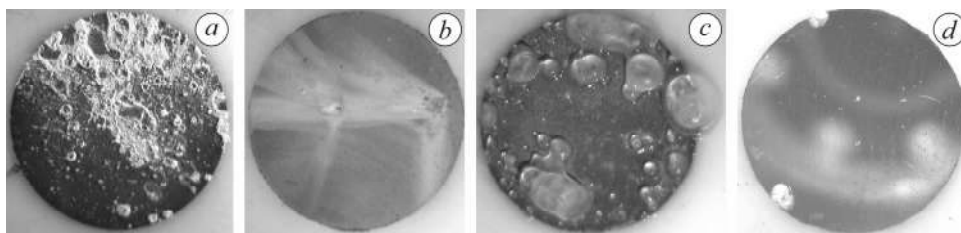


Рис. 5. Оптичне зображення поверхні сплаву Д16Т після 168 h експозиції у 0,1%-му розчині NaCl: a – неінгібоване середовище; b – 2 g/l цинку ацетату; c – 2 g/l натрію альгінату; d – по 1 g/l натрію альгінату та цинку ацетату.

Fig. 5. Optical image of D16T alloy surface after 168 h exposure to a 0.1% NaCl solution: a – uninhibited medium; b – 2 g/l of zinc acetate; c – 2 g/l of sodium alginate; d – 1 g/l of sodium alginate and zinc acetate each.

Стосовно механізму захисної дії інгібіторної композиції “натрій альгінат + +цинк ацетат” слід зазначити, що молекули альгінату адсорбуються через свої гідроксильні (–OH) і карбоксильні (–COOH) функціональні групи на поверхні алюмінієвого сплаву, витісняючи молекули води [17]. Катіони Zn²⁺, вивільнені внаслідок розчинення цинку ацетату, можуть утворювати у корозивному середовищі комплексні сполуки з альгінатом з подальшим їх осадженням на анодних ділянках металу [18]. Також на катодних ділянках алюмінієвого сплаву можливе формування плівки малорозчинних гідроксидів Zn(OH)₂. Ацетат-йони імовірно мають певний протикорозійний ефект. Зокрема, методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії виявили [19] адсорбцію ацетат-йонів на поверхні алюмінієвого сплаву в 0,1 М розчині NaCl.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що корозійна тривкість сплаву Д16Т у 0,1%-му розчині NaCl суттєво підвищується за використання екологічно безпечної інгібувальної композиції на основі полісахариду (натрію альгінату) та цинкової солі оцтової кислоти. Показано, що вона може ефективно інгібувати корозію алюмінієвого сплаву в 0,1%-му розчині NaCl. Інгібувальну дію цієї композиції пояснюємо тим, що молекули альгінату через свої гідроксильні і карбоксильні функціональні групи здатні адсорбуватися на поверхні алюмінієвого сплаву. Катіони Zn^{2+} , вивільнені розчиненням цинку ацетату, утворюють комплексні сполуки з альгінатом з подальшим їх осадженням на анодних ділянках металу. На катодних ділянках алюмінієвого сплаву також можливе формування плівки малорозчинних цинку гідроксидів. Утворення ефективної захисної плівки на алюмінієвому сплаві в інгібованому композицією хлоридному розчині підтверджується електрохімічними дослідженнями та мікрорентгеноспектральним аналізом поверхні металу.

1. Yasakau K. A., Zheludkevich M. L., and Ferreira M. G. S. Role of intermetallics in corrosion of aluminum alloys. *Smart corrosion protection // Intermetallic Matrix Composites*. – 2018. – **15**. – P. 425–462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-346-2.00015-7>
2. Yasakau K. A., Zheludkevich M. L., and Ferreira M. G. S. Corrosion and Corrosion Protection of Aluminum Alloys // *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*. – Elsevier, 2018. – P. 115–127. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.13870-3>
3. Recent progress of polymeric corrosion inhibitor: structure and application / X. Wang, S. Liu, J. Yan, J. Zhang, Q. Zhang, and Y. Yan // *Materials*. – 2023. – **16**. – Article number: 2954. <https://doi.org/10.3390/ma16082954>
4. Umoren S. A. and Eduok U. M. Application of carbohydrate polymers as corrosion inhibitors for metal substrates in different media: A review // *Carbohydrate Polymers*. – 2016. – **140**. – P. 314–341. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.038>
5. Eco-friendly metal corrosion inhibitors based on natural polymers (A review) / S. A. Korniy, I. M. Zin, M.-O. Danyliak, and Yu. Ya. Rizun // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 5. – P. 567–578. DOI:10.1007/s11003-023-00700-7
6. Corrosion inhibition of aluminum alloy by a composition of guar gum and tartrate / M. Tymus, I. Zin, O. Khlopyk, V. Pokhmurskii, M. Holovchuk, and S. Korniy // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 5. – P. 679–687. DOI:10.1007/s11003-022-00595-w
7. Steel corrosion inhibition by microbial polysaccharide and tartrate mixture / S. Korniy, I. Zin, M. Tymus, O. Khlopyk, and M. Holovchuk // *J. of Bio- and Tribo-Corrosion*. – 2022. – **8**, № 6. – P. 1–8. DOI:10.1007/s40735-021-00605-5
8. Zehra S., Mobin M., and Verma C. Biopolymers in Sustainable Corrosion Inhibition // *CRC Press*. – 2024. – P. 278. DOI: 10.1201/9781003400059
9. Umoren S. A., Solomon M. M., and Saji V. S. Alginate and its derivatives // *Polymeric Mater. in Corr. Inhibition*. – 2022. – **11**. – P. 271–286. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823854-7.00014-X>
10. Obot I. B., Onyeachu I. B., and Kumar A. M. Sodium alginate: a promising biopolymer for corrosion protection of API X60 high strength carbon steel in saline medium // *Carbohydrate Polymers*. – 2017. – **178**. – P. 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.049>
11. The synergistic influence of polyethyleneimine-grafted graphene oxide and iodide for the protection of steel in acidizing conditions / K. Ansari, D. S. Chauhan, M. A. Quraishi, A. Y. Adesina, and T. A. Saleh // *RSC Adv*. – 2020. – P. 17739–17751. <https://doi.org/10.1039/D0RA00864H>
12. Mobin M. and Rizvi M. Inhibitory effect of xanthan gum and synergistic surfactant additives for mild steel corrosion in 1 M HCl // *Carbohydrate Polymers*. – 2016. – **136**. – P. 384–393. DOI:10.1016/j.carbpol.2015.09.027
13. Corrosion behavior of aluminum in some short-chain carboxylic acid solutions as a simulant for cooling water in HVDC transmission / Z. Wang, Y. Zou, K. Xiao, Y. Fan, and S. Wang // *Int. J. of Electrochem. Sci*. – 2022. – **17**, № 12. – Article number: 221254. <https://doi.org/10.20964/2022.12.54>

14. *Georges C., Rocca E., and Steinmetz P.* Synergistic effect of tolutriazol and sodium carboxylates on zinc corrosion in atmospheric conditions // *Electrochimica Acta*. – 2008. – **53**, № 14. – P. 4839–4845. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.01.073>
15. *Salehi E., Naderi R., and Ramezanzadeh B.* Synthesis and characterization of an effective organic/inorganic hybrid green corrosion inhibitive complex based on zinc acetate/*Urtica Dioica* // *Appl. Surf. Sci.* – 2017. – **396**. – P. 1499–1514. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.198>
16. *Danyliak M.-O. M., Zin I. M. and Korniy S. A.* Corrosion inhibition of low-alloy carbon steel by gum Arabic and zinc acetate in neutral chloride-containing environment // *J. of Industrial and Eng. Chemistry*. – 2024. – **129**. – P. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.08.039>
17. *Influence of sodium alginate and chromate on aluminum corrosion in simulated HVDC cooling water* / Z. Wang, Z. Cai, X. Han, H. Zhang, Z. Shao, K. Xiao, Y. Fan, and S. Wang // *Int. J. of Electrochem. Sci.* – 2023. – **18**, № 4. – Article number: 100073. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100073>
18. *Biosorption of Pb²⁺ and Zn²⁺ by Ca-alginate immobilized and free extracellular polysaccharides produced by Leuconostoc citreum B-2* / X. Xu, L. Zhang, Y. Han, and Z. Zhou // *Int. J. of Biological Macromolecules*. – 2021. – **193**, Pt. B. – P. 2365–2373. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.070>
19. *The synergistic effect of cerium acetate and sodium sulphate on corrosion inhibition of AA2024-T3 at various temperatures* / P. Rodič., M. Lekka, F. Andreatta, I. Milošev, and L. Fedrizzi // *Electrochimica Acta*. – 2021. – **370**. – Article number: 137664. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137664>

Одержано 09.03.2024