

## ІНГІБУВАННЯ КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ В ХЛОРИДОВМІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ КОМПОЗИЦІЄЮ НА ОСНОВІ ДЕКСТРИНУ ТА НАТРІЮ ІЗОАСКОРБАТУ

М. Б. ТИМУСЬ<sup>1</sup>, І. М. ЗІНЬ<sup>1,2</sup>, С. А. КОРНІЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

Методами електрохімічної імпедансної спектроскопії, електронної сканівної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу досліджено інгибування корозії алюмінієвого сплаву в нейтральному хлоридовмісному середовищі композицією, яка містила рівні масові кількості декстрину та натрію ізоаскорбату. Встановлено зростання приблизно у 20 разів опору переносу заряду алюмінієвого сплаву внаслідок захисної дії інгібіторної композиції за її оптимальної концентрації. На поверхні металу в інгибованому розчині виявлено щільну адсорбційну органічну плівку. Ступінь захисту металу від корозії декстрин-ізоаскорбатною композицією перевищує 90%. Практичний ефект дослідження полягає в можливості отримання екологічно безпечної інгібіторної композиції на основі відновної рослинної сировини для захисту від корозії конструкцій з алюмінієвих сплавів.

**Ключові слова:** *декстрин, натрій ізоаскорбат, інгибування корозії, алюмінієвий сплав, електрохімічна імпедансна спектроскопія, енергодисперсійний рентгенівський аналіз, ступінь захисту.*

Using the methods of electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, and energy dispersive X-ray analysis, the corrosion inhibition of aluminum alloy in a neutral chloride-containing environment with a composition containing equal weight amounts of dextrin and sodium isoascorbate was investigated. An approximately 20-time increase in the charge transfer resistance of the aluminum alloy due to the protective effect of the inhibitory composition at its optimal concentration was established. A dense adsorption organic film was found on the surface of the metal in the inhibited solution. The degree of metal corrosion protection by the dextrin-isoascorbate composition exceeds 90%. The practical effect of the research is the possibility of obtaining an environment friendly inhibitory composition based on renewable plant materials for corrosion protection of aluminum alloy constructions.

**Keywords:** *dextrin, sodium isoascorbate, corrosion inhibition, aluminium alloy, electrochemical impedance spectroscopy, energy dispersive X-ray analysis, degree of protection.*

**Вступ.** Корозія металів завдає величезних економічних збитків, знижуючи довговічність металевих конструкцій та обладнання у промисловості, будівництві, на транспорті тощо. Тому важливо забезпечити для них ефективний протикорозійний захист і, відповідно, тривалий ресурс роботи [1]. Використання інгібіторів корозії є одним з ключових способів протикорозійного захисту металів. Вони можуть бути органічними та неорганічними [2, 3]. Переважно їх отримують хімічним синтезом. Відходи хімічного виробництва після спеціальної обробки також можна використовувати як інгібітори корозії. Однак синтетичні інгібітори корозії, зокрема хромати, є токсичними для людини [4]. Перевищення їх критичної концентрації у воді або ґрунті може мати негативний вплив на природну екосистему [5].

Останнім часом інтенсивно досліджують інгібування корозії металів у різних середовищах природними полісахаридами [6–8]. Встановлено залежність інгібіторної ефективності цих біополімерів від їх концентрації, молекулярної маси й структури та показано, що механізм захисної дії зумовлений адсорбцією їх полярних функціональних груп, що спричинює блокування доступу корозивного середовища до поверхні металу [9–11]. Полісахариди є екобезпечними та біодеградабельними. Джерелом їх отримання є відновлювані рослинні ресурси [12, 13].

Декстрин є представником низькомолекулярних вуглеводневих біополімерів, які структурно характеризуються одиницями глюкози (D), з'єднаними глікозидними зв'язками [ $\alpha$ -(1→4) або  $\alpha$ -(1→6)] і є у формі мальто-, аміло- та  $\alpha$ , $\beta$ -декстрину з циклічно розгалуженою структурою [9]. Він виявився ефективним інгібітором корозії алюмінієвого сплаву в лужних корозивних середовищах [9, 14]. Встановлено також інгібування ним корозії алюмінієвих сплавів у кислих середовищах [9], однак, у нейтральних сольових розчинах його протикорозійна ефективність на алюмінієвому сплаві недостатня [15]. Раніше показано [7] помітне підсилення захисної дії полісахариду (гуарової камеді) органічною сіллю (натрієм тартратом) ( $\eta = 90\%$ ). Тому мета роботи – вивчити можливість підвищення захисних властивостей біополімеру (декстрину кукурудзяного) стосовно алюмінієвого сплаву в 0,1%-му розчині NaCl органічною сіллю (натрієм ізоаскорбатом).

**Матеріали та методи дослідження.** Корозію дюралюмінієвого сплаву Д16Т досліджували в 0,1%-му розчині NaCl, в який як інгібітори корозії додавали природний полісахарид – декстрин кукурудзяний (ДК)  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , де  $n$  – число полімеризації, та натрію ізоаскорбат (НІА)  $C_6H_7NaO_6$ , придбані в ПП “Система Оптимум”. У корозивний розчин додавали як окремі речовини, так і їх композиції.

Характеристики корозійних процесів вивчали у потенціодинамічному режимі, застосовуючи потенціостат Gill AC. Електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1, робочий – дюралюмінієвий сплав Д16Т (AA 2024), допоміжний – платиновий. Швидкість розгортки потенціалу 2 mV/s. Ефективність інгібування корозії Д16Т досліджували методом електрохімічної імпедансної спектроскопії за потенціалу відкритого кола у діапазоні частот 10000...0,01 Hz на приладі Gill AC. Амплітуда прикладеного сигналу 10 mV. Площа робочої поверхні зразків сплаву становила 1 cm<sup>2</sup>. Зразки металу перед зануренням у середовище обробляли шліфувальним папером марки P320 та знежирювали ацетоном. Поверхню Д16Т після витримки в корозивному та інгібованих середовищах обстежували на мікроскопі Chgonos за збільшення у 50 разів, а також на сканівному електронному мікроскопі Zeiss EVO-40XVP зі системою рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу INCA Energy 350.

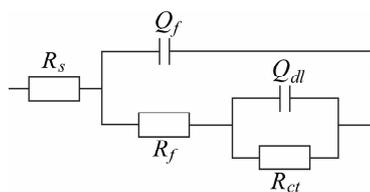


Рис. 1. Електричне еквівалентне коло, яке моделює корозію алюмінієвого сплаву в 0,1%-му розчині NaCl:  $R_s$  – опір корозивного середовища;  $Q_f$  – ємність захисної поверхневої плівки на сплаві, яка виражена через елемент сталої фази;  $R_f$  – опір електролітного середовища в порах захисної плівки;  $Q_{dl}$  – ємність електричного подвійного шару на металі, яка виражена через елемент сталої фази;  $R_{ct}$  – опір переносу заряду металу.

Видалено:

Fig. 1. Electric equivalent circuit simulating corrosion of an aluminum alloy in a 0.1% NaCl solution:  $R_s$  is corrosive environment resistance;  $Q_f$  is capacity of protective surface film on the alloy expressed in terms of constant phase element;  $R_f$  is electrolytic medium resistance in the protective film pores;  $Q_{dl}$  is capacitance of a double electric layer on the metal expressed in terms of constant phase element;  $R_{ct}$  is charge transfer resistance of metal.

Отримані після 24 h експозиції імпедансні залежності сплаву Д16Т у контрольному та інгібованих композиціях ДК+НІА середовищах моделювали за допомогою програми EIS Spectrum Analyser з використанням електричного еквівалентного кола (рис. 1).

Інгібувальну ефективність  $\eta$  (%) інгібіторів корозії визначали за поляризаційним опором  $R_p$  (сума опорів переносу заряду  $R_{ct}$  і плівки  $R_f$ ) за формулою

$$\eta = \left( R_p - \frac{R_{p0}}{R_p} \right) \cdot 100\% ,$$

де  $R_p$  та  $R_{p0}$  – поляризаційний опір металу з та без інгібітора, відповідно.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Електрохімічні випробування показали (рис. 2), що досліджуваний полісахарид сповільнює корозію металу в 0,1% NaCl лише за досить високої концентрації (4 g/l). За його невеликих концентрацій (0,5...2 g/l) й експозиції 24 h інгібуння корозії алюмінієвого сплаву мінімальне. За вмісту полісахариду в середовищі 4 g/l відбулося різке зростання модуля імпедансу металу ( $Z_{0,1}$ ) за частоти струму 0,1 Hz. Тут  $Z_{0,1}$  дорівнював  $2,45 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , тоді як в неінгібованому корозивному середовищі та за вмісту полісахариду 2 g/l він не перевищував  $3,75 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$  (рис. 2a).

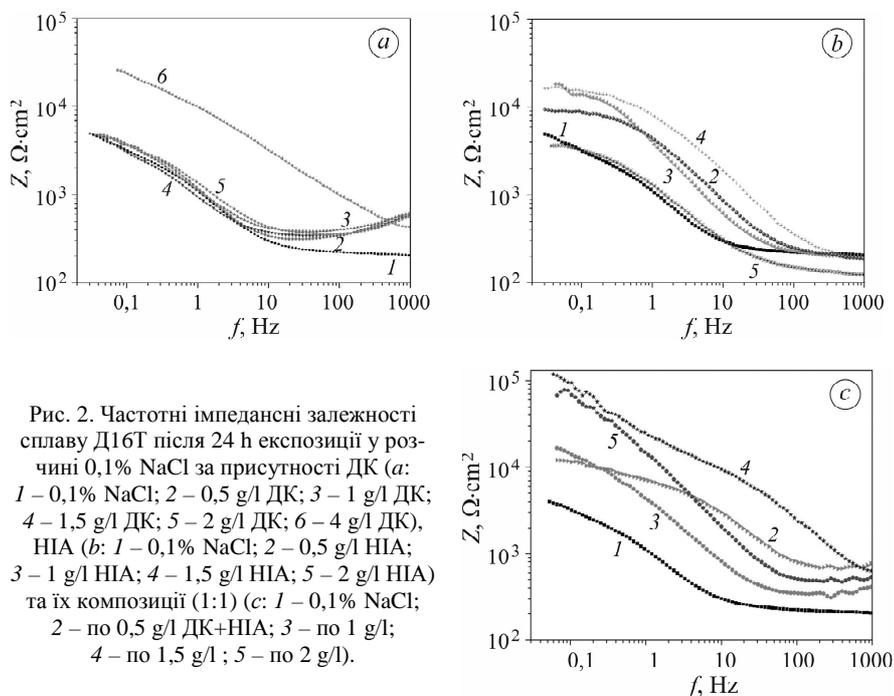


Рис. 2. Частотні імпедансні залежності сплаву Д16Т після 24 h експозиції у розчині 0,1% NaCl за присутності ДК (а: 1 – 0,1% NaCl; 2 – 0,5 g/l ДК; 3 – 1 g/l ДК; 4 – 1,5 g/l ДК; 5 – 2 g/l ДК; 6 – 4 g/l ДК), НІА (b: 1 – 0,1% NaCl; 2 – 0,5 g/l НІА; 3 – 1 g/l НІА; 4 – 1,5 g/l НІА; 5 – 2 g/l НІА) та їх композиції (1:1) (c: 1 – 0,1% NaCl; 2 – по 0,5 g/l ДК+НІА; 3 – по 1 g/l; 4 – по 1,5 g/l; 5 – по 2 g/l).

Fig. 2. Frequency impedance dependences of Д16Т alloy after 24 h of exposure to 0.1% NaCl solution in the presence of com dextrin (CD) (a: 1 – 0.1% NaCl; 2 – 0.5 g/l CD; 3 – 1 g/l CD; 4 – 1.5 g/l CD; 5 – 2 g/l CD; 6 – 4 g/l CD), sodium isoascorbate (SIA) (b: 1 – 0.1% NaCl; 2 – 0.5 g/l NIA; 3 – 1 g/l SIA; 4 – 1.5 g/l SIA; 5 – 2 g/l SIA) and their composition (1:1) (c: 1 – 0.1% NaCl; 2 – 0.5 g/l CD+SIA; 3 – 1 g/l; 4 – 1.5 g/l; 5 – 2 g/l).

Проте за використання лише декстрину (4 g/l) після 24 h експозиції на поверхні утворюються продукти корозії. За індивідуального використання в корозивному розчині натрію ізоаскорбату за концентрацій 0,5...2 g/l його інгібувальна

ефективність нижча порівняно з декстрином концентрацією 4 г/л. За додавання 1,5 г/л НІА максимальне значення  $Z_{0,1}$  металу становить лише  $1,55 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  (рис. 2b). Ймовірно, за більших концентрацій захисна плівка на алюмінієвому сплаві руйнується через здатність НІА збільшувати рН розчину. Тому збільшувати концентрацію цієї солі до 2 г/л малоефективно.

За сумісного додавання в 0,1% розчин NaCl декстрину та натрію ізоаскорбату протикорозійні характеристики (ступінь захисту металу  $\eta$ ,  $Z_{0,1}$ ) сплаву Д16Т суттєво підвищуються (рис. 2c). Зі збільшенням концентрації інгібіторної композиції з 0,5 до 2 г/л кожного складника за масового співвідношення 1:1 після 24 h експозиції спостерігаємо посилення інгібування корозії металу. Відповідно значення  $Z_{0,1}$  сплаву Д16Т змінюється в межах  $(1,31 \dots 9,42) \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  (рис. 2c). Ступінь захисту металу за інгібування середовища досліджуваною композицією (ДК + НІА) за концентрацій по 1,5 та 2 г/л – 97...98% (табл. 1), що є вищим, ніж за 4 г/л ДК ( $\eta = 86\%$ ).

**Таблиця 1. Характеристики еквівалентного електричного кола (див. рис. 1), розраховані на основі імпедансних спектрів алюмінієвого сплаву в контрольному та інгібованих розчинах за експозиції 24 h**

Нумерація спектрів згідно з рис. 2c	$R_{ct}$ , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Y_0(Q_{dl})$ , $\text{s}^n/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$n(Q_{dl})$	$R_f$ , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Y_0(Q_f)$ , $\text{s}^n/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$n(Q_f)$	$\eta$ , %
1	6449	$9,59 \cdot 10^{-4}$	0,63	196	$2,06 \cdot 10^{-4}$	0,79	-
2	15320	$7,11 \cdot 10^{-5}$	0,29	550	$2,64 \cdot 10^{-5}$	0,91	58
3	16626	$4,48 \cdot 10^{-5}$	0,85	313	$3,57 \cdot 10^{-5}$	0,96	61
4	145360	$1,15 \cdot 10^{-5}$	0,74	680	$1,28 \cdot 10^{-6}$	0,91	98
5	89771	$1,31 \cdot 10^{-5}$	0,91	640	$5,64 \cdot 10^{-6}$	0,91	97

**Примітка:**  $Y_0(Q_{dl})$ ,  $n(Q_{dl})$  – провідність та показник степеня елемента сталої фази  $Q_{dl}$  відповідно;  $R_f$  – опір корозивного середовища;  $Y_0(Q_f)$ ,  $n(Q_f)$  – провідність та показник степеня елемента сталої фази  $Q_f$  відповідно.

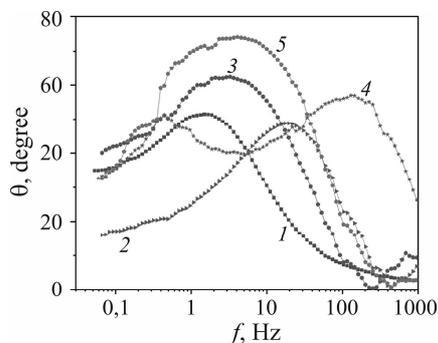
Максимуми фазових кутів ( $\theta$ ) (рис. 3) дюралюмінієвого сплаву після 24 h експозиції в інгібованих композицією ДК+НІА розчинах перебували в межах  $56 \dots 74^\circ$ , за винятком концентрацій 0,5 г/л кожного складника. У неінгібованому середовищі фазовий кут становив  $50^\circ$ . У розчині, інгібованому композицією ДК+НІА (1:1) по 1,5 г/л (рис. 3), спостерігали формування двох піків зі зміщенням правого максимуму  $\theta$  у діапазон середніх частот  $40 \dots 120$  Hz, що, ймовірно, пов'язано з формуванням саме за цієї концентрації найстійкішої захисної плівки.

Збільшення та зміщення максимуму частотної залежності фазового кута в область вищих частот струму в інгібованому композицією ДК+НІА розчині можна пояснити формуванням на поверхні металу стійкої захисної плівки, яка створює фізичний бар'єр на шляху переміщення йонів або молекул до та з металевої поверхні, гальмуючи так електродні реакції. Відмічено [16], що подібний ефект є тоді, коли молекула інгібітора має довгий вуглеводневий ланцюг, як у випадку декстрину. У праці [17] формування захисної плівки пов'язують з тим, що гідроксильні групи молекули ДК можуть утворювати координаційні зв'язки з поверхнею металу. Однак захисна плівка, сформована на поверхні металу біополімером, може відрізнитися від утвореної низькомолекулярними сполуками. З літератури відомо [18, 19], що полімерна молекула, адсорбована твердою поверхнею, утворює на ній складки або петлі, які простягаються в розчин полімеру. При цьому

складки формують своєрідну “щетину” на поверхні. В результаті захисна плівка стає товстішою, проте пористою і нещільною. Імовірно, тому декстрин як індивідуальна сполука недостатньо захищає алюмінієвий сплав від корозії в нейтральному розчині.

Рис. 3. Залежності фазового кута зразків сплаву Д16Т після 24 h експозиції в 0,1% NaCl, інгібованому композицією ДК+НІА (1:1): 1 – 0,1% NaCl; 2 – по 0,5 g/l; 3 – по 1 g/l; 4 – по 1,5 g/l; 5 – по 2 g/l кожного складника.

Fig. 3 Dependences of the phase angle of D16T alloy samples after 24 h of exposure to 0.1% NaCl inhibited by the composition CD+SIA (1:1): 1 – 0.1% NaCl; 2 – 0.5 g/l; 3 – 1 g/l; 4 – 1.5 g/l; 5 – 2 g/l of each component.



Згідно з результатами електрохімічної імпедансної спектроскопії (рис. 2с), сумісне використання в хлоридовмісному корозивному середовищі декстрину та натрію ізоаскорбату сприяє утворенню на алюмінієвому сплаві стійкішої органічної плівки. Імовірно, аскорбат-аніони додатково ущільнюють полісахаридну плівку, утворюючи малорозчинні комплексні сполуки з йонами  $Al^{3+}$  та  $Cu^{2+}$ , які є в розчині внаслідок реакцій електрохімічної корозії алюмінієвого сплаву. Можливість виникнення таких комплексів підтверджено іншими авторами [20–22].

Отримані результати (табл. 1) з використанням програми EIS Spectrum Analyser та електричного еквівалентного кола (див. рис. 1) такі: за присутності композиції ДК+НІА (1:1) різних концентрацій та експозиції 24 h опір переносу заряду ( $R_{ct}$ ) алюмінієвого сплаву значно зріс порівняно зі значенням в неінгібованому середовищі. При цьому концентрації 1,5 та 2 g/l кожного складника виявились найефективнішими.

Згідно з табл. 1, за присутності композиції ДК+НІА (1:1) з концентраціями 1,5 та 2 g/l кожного складника  $R_{ct}$  становив  $1,45 \cdot 10^5$  та  $8,98 \cdot 10^4 \Omega \cdot cm^2$ , відповідно, що приблизно на два та один порядки вище від значень у неінгібованому розчині. Відповідно збільшується провідність  $Y_0(Q_{dl})$  порівняно з неінгібованим розчином, що свідчить про утворення на поверхні захисної плівки. В 0,1% NaCl знижується провідність  $Y_0(Q_{dl})$  внаслідок локального руйнування алюмінієвого сплаву. Отже, інгібувальна ефективність  $\eta$  досліджуваних композицій (ДК+НІА) з 1,5 та 2 g/l кожного складника є найвищою, відповідно зі зростанням опору переносу заряду металу  $R_{ct}$  в 14–23 рази.

Огляд поверхні алюмінієвого сплаву за допомогою USB-мікроскопа після 7 days експозиції виявив інтенсивну корозію металу в 0,1% розчині NaCl без додавання інгібіторної композиції ДК+НІА та тоді, коли її концентрація в хлоридовмісному середовищі не перевищувала 1 g/l (рис. 4). За вмісту композиції ДК+НІА з концентрацією по 1,5 g/l в корозивному середовищі поверхня сплаву була без продуктів корозії та мала характерний металевий блиск (рис. 4d). За концентрації по 2 g/l ДК+НІА поверхня металу незначно прокородувала (рис. 4e), ймовірно внаслідок підкислення середовища через більшу концентрацію декстрину кукурудзяного.

Методами сканівної електронної мікроскопії та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії досліджено морфологію та хімічний склад поверхні алюмінієвого сплаву після 7 days експозиції в неінгібованому та інгібованому композицією ДК+НІА з концентрацією по 1,5 g/l розчинах (рис. 5).

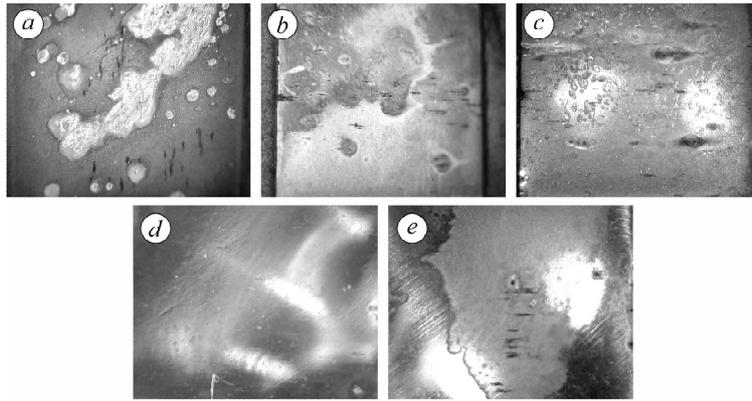


Рис. 4. Поверхня сплаву Д16Т після експозиції 7 days в 0,1%-му розчині NaCl, інгібованому композицією ДК+НІА (1:1): *a* – 0,1% NaCl g/l; *b* – по 0,5 g/l; *c* – по 1 g/l; *d* – по 1,5 g/l; *e* – по 2 g/l кожного складника.

Fig. 4. Surface of the D16T alloy after 7-day exposure to 0.1% NaCl inhibited with the composition CD+SIA (1:1): *a* – 0.1% NaCl g/l; *b* – 0.5 g/l; *c* – 1 g/l; *d* – 1.5 g/l; *e* – 2 g/l of each component.

Встановлено (рис. 5; табл. 2), що в неінгібованому 0,1%-му розчині NaCl поверхня металу повністю вкрита продуктами корозії, які, ймовірно, склались з алюмінію оксидів/гідроксидів, а у складі поверхневої плівки виявлено хлор. Проте за експозиції в середовищі, інгібованому композицією ДК (1,5 g/l) + НІА (1,5 g/l), на поверхні сплаву утворилась захисна плівка та відсутні сліди корозії.

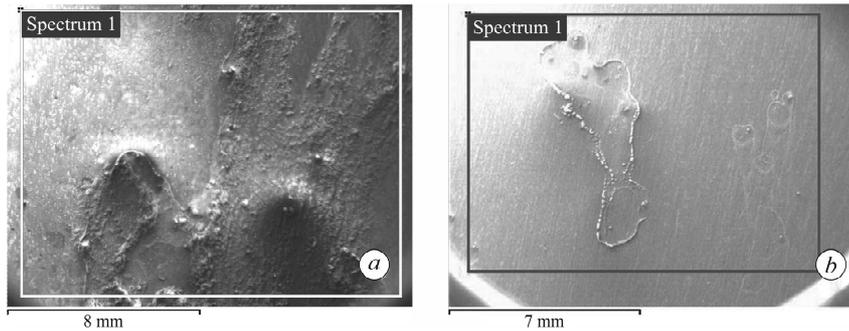


Рис. 5. Поверхня сплаву Д16Т після експозиції 7 days в 0,1%-му розчині NaCl (*a*) та в інгібованому композицією ДК+НІА концентрацією 1,5 g/l кожного складника (*b*).

Fig. 5. Surface of D16T alloy after 7-day exposure to uninhibited 0.1% NaCl solution (*a*) and inhibited with the composition CD+SIA with a concentration of 1.5 g/l (*b*) of each component.

**Таблиця 2. Елементний склад поверхні сплаву Д16Т після 7 days у 0,1%-му розчині NaCl та за додавання композиції ДК+НІА**

Розчин	Вміст, wt%							
	C	O	Mg	Al	Mn	Fe	Cu	Cl
0,1% NaCl	5,4	35,53	1,12	55,89	–	–	4	0,19
0,1% NaCl + ДК + НІА	12,00	11,05	1,32	72,90	0,38	0,32	2	–

Енергодисперсійним мікроаналізом в інгібованому розчині на поверхні алюмінієвого сплаву виявили зменшення вмісту кисню до 11,05 wt% та збільшення

вуглецю до 12 wt%, тоді як в неінгібованому вміст кисню становив 35,53 wt%, а вуглецю – 5,4 wt% (табл. 2). Збільшення вмісту кисню свідчить, ймовірно, про утворення оксидів і гідроксидів металу в неінгібованому середовищі, а збільшення вуглецю в інгібованому розчині – про формування на поверхні органічної адсорбційної плівки.

### ВИСНОВКИ

Методами електрохімічної імпедансної спектроскопії та електронної мікроскопії встановлено високу ефективність інгібування корозії алюмінієвого сплаву Д16Т в 0,1%-му розчині хлориду натрію композицією біополімеру декстрину та натрію ізоаскорбату по 1,5 г/л кожного з компонентів. На поверхні зразків виявлено щільну органічну адсорбційну плівку, яка забезпечує ступінь захисту металу від корозії більше 90%. Можливий механізм захисної дії композиції полягає в адсорбції біополімеру декстрину через встановлення координаційних зв'язків між його гідроксильними групами та поверхнею металу й додатковому ущільненні захисної органічної плівки малорозчинними комплексними сполуками аскорбат-аніонів з катіонами алюмінію та міді. Практичний ефект дослідження полягає в можливості отримання екологічно безпечної композиції з відновної рослинної сировини для захисту від корозії конструкцій з алюмінієвих сплавів.

1. Lyon S. Overview of corrosion engineering, science and technology / Ed.: D. Feron // Nuclear Corr. Sci. and Eng. – Woodhead Publ. Series in Energy, 2012. – 1. – P. 3–30. <https://doi.org/10.1533/9780857095343.1.3>
2. Sanyal B. Organic compounds as corrosion inhibitors in different environments: A review // Progress in organic coatings. – 1981. – 9, № 2. – P. 165–236. [https://doi.org/10.1016/0033-0655\(81\)80009-X](https://doi.org/10.1016/0033-0655(81)80009-X)
3. Monticelli C. Corrosion Inhibitors / Ed.: K. Wandelt // Encyclopedia of interfacial chemistry. – Elsevier, 2018. – P. 164–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13443-2>
4. Zehra S., Mobin M., and Aslam J. Chromates as corrosion inhibitors / Eds.: C. Verma, J. Aslam, and C. M. Hussain // Inorganic Anticorrosive Materials. – Elsevier, 2022. – Chapter 13. – P. 251–268. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90410-0.00014-3>
5. Basik M. and Mobin M. Environmentally sustainable corrosion inhibitors in the oil and gas industry / Eds.: C. M. Hussain, C. Verma, J. Aslam // Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors. – Elsevier, 2022. – P. 405–421. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85405-4.00017-3>
6. Eco-friendly metal corrosion inhibitors based on natural polymers. A review / S. A. Korniy, I. M. Zin, M.-O. M. Danyliak, and Y. Y. Rizun // Materials Science. – 2023. – 58, № 5. – P. 567–578. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00700-7>
7. 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. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00595-w>
8. 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. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00605-5>
9. 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>
10. An appraisal of the utilization of natural gums as corrosion inhibitors: Prospects, challenges, and future perspectives / U. J. Timothy, P. S. Umoren, M. M. Solomon, I. O. Igwe, and S. A. Umoren // Int. J. of Biological Macromolecules. – 2023. – 253, P. 3. – Article number 126904. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126904>
11. 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>

12. *Green corrosion inhibitors based on biomacromolecules and macrocycles: A review* / D. S. Chauhan, A. A. Sorour, V. S. Saji, and M. A. Quraishi // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. – 2023. – **36**. – Article number 101295. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101295>
13. *Heteropolysaccharides in sustainable corrosion inhibition: 4E (Energy, Economy, Ecology, and Effectivity) dimensions* / R. Ganjoo, S. Sharma, C. Verma, M.A. Quraishi, and A. Kumar // *Int. J. of Biological Macromolecules*. – 2023. – **235**. – Article number 123571. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123571>
14. *Jafari B., Yousefpour M., and Azadi M. The inhibition effect of white dextrin on Al1050 alloy corrosion behavior in the NaOH media: Thermodynamic and kinetic study* // *J. of the Indian Chemical Society*. – 2023. – **100**, № 10. – Article number 101089. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.101089>
15. *Corrosion inhibitors for aluminium and aluminium-based alloys. Part I* / M. N. Desai, S. M. Desai, M. H. Gandhi, and C. B. Shah // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. – 1971. – **18**, № 4. – P. 8–13. <http://dx.doi.org/10.1108/eb006818>
16. *Thomas J. G. N. The Mechanism of Corrosion Prevention by Inhibitors* / Eds.: L. L. Shreir, R. A. Jarman, and G. T. Burstein // *Corrosion*. – Butterworth-Heinemann, 1994. – P. 17:40–17:65. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052351-4.50126-6>
17. *Analysis of the anti-corrosion performance of dextrin and its graft copolymer on j55 steel in acid solution* / M. Liu, D. Xia, A. Singh, and Y. Lin // *Processes*. – 2021. – **9**. – Article number 1642. – <https://doi.org/10.3390/pr9091642>
18. *Лунатов Ю. С., Сергеева Л. М. Адсорбция полимеров*. – К.: Наук. думка, 1972. – 196 с.
19. *Gregory J. and Barany S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures* // *Adv. in Colloid and Interface Sci.* – 2011. – **169**, № 1. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.06.004>
20. *Potentiometric and multinuclear NMR studies on the interaction of aluminum with ascorbic acid in acidic aqueous solution* / X. Yang, Q. Miao, T. Yu, Jun Hu, Z. Yang, and S. Bi // *Spectrochimica acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2003. – **59**, № 11. – P. 2655–2665. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(03\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(03)00035-0)
21. *Ritacca A. G. Experimental and theoretical study of the complexation of Fe<sup>3+</sup> and Cu<sup>2+</sup> by L-ascorbic acid in aqueous solution* // *J. of Molecular Liquids*. – 2022. – **355**. – Article number 118973. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118973>
22. *Tajmir-Riahi H. A. Coordination chemistry of vitamin C. Part III. Interaction of L-ascorbic acid with Al(III), La(III), and Pb(II) ions. Evidence for metal chelate formation in the solid and aqueous solution* // *J. of Inorganic Biochemistry*. – 1991. – **44**, № 1. – P. 39–45. [https://doi.org/10.1016/0162-0134\(91\)80059-Q](https://doi.org/10.1016/0162-0134(91)80059-Q)

*Одержано 01.05.2024*