УДК 620.197

С.А. Корній, І.М. Зінь, Н.Й. Сободош, О.П. Хлопик, Н.Б. Рацька, Б.М. Дацко

ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ ІНГІБІТОРНОЇ КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ НАТРІЙ АЛЬГІНАТУ ТА ЦИНК АЦЕТАТУ НА ТРИБОКОРОЗІЙНУ ПОВЕДІНКУ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна

Досліджено вплив екологічно безпечної інгібіторної композиції на основі альгінату натрію та ацетату цинку на корозійно-механічне зношування алюмінієвого сплаву Д16Т у хлоридовмісному середовищі. Встановлено, що за умов тертя ця композиція сприяє формуванню на поверхні сплаву захисної плівки з покращеними антифрикційними властивостями та підвищеною механічною стійкістю порівняно з природною оксидною плівкою. Це зумовлює зниження коефіцієнта тертя приблизно удвічі та струму поляризації – утричі, що свідчить про ефективне пригнічення процесів іонізації металу та зменшення інтенсивності зношування. На основі результатів сканувальної електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу зроблено припущення, що захисний шар складається з алюміній–альгінатних комплексів і сполук цинку, які перешкоджають корозійно-механічному руйнуванню. Формування гладкої поверхні з мінімальними пошкодженнями в інгібованому середовищі підтверджено за допомогою тривимірної профілометрії.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, трибокорозія, механічна активація, коефіцієнт тертя, інгібіторна композиція, натрій альгінат, цинк ацетат.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-163-6-72-79

Вступ

Алюміній і його сплави вирізняються високою корозійною стійкістю в багатьох робочих середовищах, що зумовлює їх широке використання у різних галузях промисловості. Стійкість до корозії у водних розчинах забезпечується наявністю на їх поверхні захисної оксидної плівки [1]. Проте під час експлуатації вироби з алюмінієвих сплавів часто зазнають одночасного впливу корозії та механічного зношування [2,3]. За таких умов оксидна плівка руйнується під дією механічного навантаження, внаслідок чого швидкість корозійного процесу значно зростає. У роботі [4] зроблено висновок про синергетичний характер взаємодії цих двох процесів.

Одним із найефективніших і водночас економічно доцільних методів захисту металів від корозійно-механічного руйнування є застосування інгібіторів корозії, які сповільнюють електрохімічне розчинення металу, не підвищуючи при цьому швидкість зношування. Встановлено, що такі інгібітори, як октаноат натрію [5] та модифікований фосфат цинку [6], знижують швидкість трибокорозії алюмінієвих сплавів у корозивних середовищах завдяки утворенню на поверхні захисного бар'єрного шару. Цей шар не лише пригнічує електрохімічні процеси розчинення металу, але й зменшує коефіцієнт тертя, що сприяє

© С.А. Корній, І.М. Зінь, Н.Й. Сободош, О.П. Хлопик, Н.Б. Рацька, Б.М. Дацко, 2025

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

S.A. Korniy, I.M. Zin, N.Y. Sobodosh, O.P. Khlopyk, N.B. Ratska, B.M. Datsko

зниженню інтенсивності зношування.

Перспективними, екологічно безпечними інгібіторами корозії можуть бути природні біополімери [7–9]. Зокрема, значну увагу привертають альгінати – солі альгінової кислоти, одержані з бурих морських водоростей [10]. Завдяки здатності утворювати стабільні комплекси з катіонами металів, альгінати можуть слугувати основою для створення композицій із підвищеною захисною ефективністю [11]. Нещодавні дослідження показали [12], що поєднання натрію альгінату та ацетату цинку в одній композиції ефективно інгібує корозію алюмінієвого сплаву в 0,1% хлоридному розчині, забезпечуючи ступінь захисту металу від корозії до 98%. Водночас важливо оцінити захисну дію такої композиції в умовах, коли пасивна оксидна плівка на поверхні алюмінієвого сплаву зазнає постійного механічного руйнування.

Тому метою цієї роботи було дослідити вплив композиції на основі натрій альгінату та цинк ацетату на корозійно-механічне зношування алюмінієвого сплаву Д16Т.

Методика досліджень

Трибокорозійні випробування проводили на установці, що працює за схемою тертя «корундова кулька–площина» (рис. 1). Установка складається з рами, зворотно-поступального столика та опори, на якій закріплено індентор. Переміщення столика здійснюється електродвигуном через черв'ячну передачу. На столику фіксували зразок сплаву, до якого кріпили електрохімічну комірку, притиснуту до зразка за допомогою гумового ущільнення. Пару тертя навантажували вантажем, розміщеним у верхній частині індентора. Датчики деформації, закріплені на опорі індентора, реєстрували момент сили тертя. За отриманими значеннями цього моменту розраховували коефіцієнт тертя між керамічною кулькою та поверхнею алюмінієвого сплаву. Параметри випробувань: навантаження на контртіло – 2 Н, швидкість ковзання індентора – 1,6 мм·с$^{-1}$, довжина сліду зношування – 24 мм.

Для досліджень використовували плоскі зразки з алюмінієвого сплаву Д16Т такого хімічного складу (мас.%): Al (90,8–94,7), Cu (3,8–4,9), Mg (1,20–1,80), Mn (0,30–0,90), Si (до 0,5), Fe (до 0,5), Zn (до 0,3). Зразки шліфували абразивним папером SiC Foil із зернистістю 320, 500 і 800 grit, після чого полірували алмазними суспензіями Dia Ultra із розміром частинок 15, 9, 3 і 1 мкм. Після полірування параметри шорсткості поверхні становили: R_a=0,06 мкм, R_z=0,32 мкм.

Дослідження проводили в 0,1% розчині NaCl, до якого як інгібітор додавали натрій альгінат і композицію на його основі з рівним співвідношенням компонентів. Концентрація інгібіторів становила 1 г/л. Зразки витримували у корозивних розчинах протягом 1 год для врівноваження та стабілізації потенціалу (стандарт ASTM G119). Тривалість тертя становила 900 с. Під час трибокорозійних випробувань поляризаційний струм алюмінієвого сплаву при вільному корозійному потенціалі реєстрували за допомогою потенціостата-гальваностата MTech SPG-500,

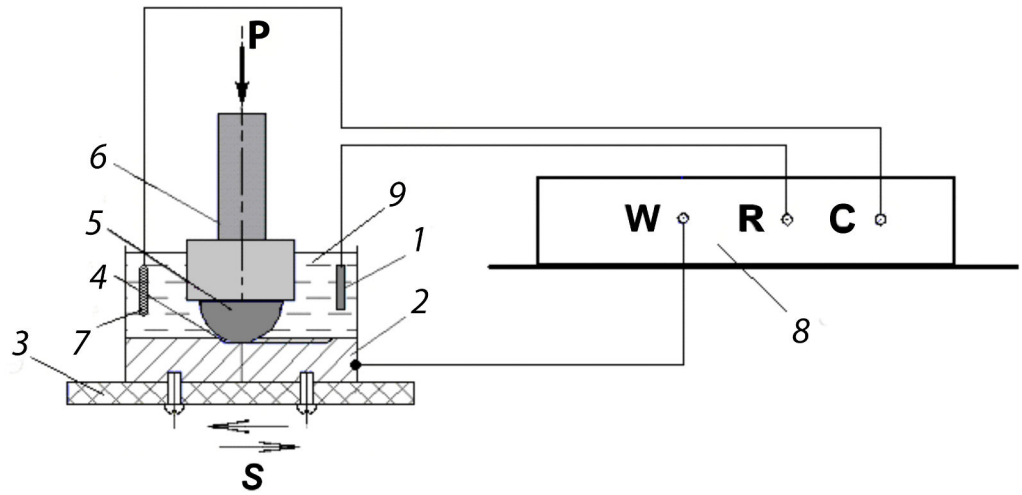


Рис.1. Схема випробування на корозійне зношування алюмінієвого сплаву: 1) насичений Ag/AgCl електрод порівняння; 2) досліджуваний зразок; 3) зворотно-поступальний столик; 4) контактна зона; 5) корундова кулька, ∅=9 мм; 6) опора індентора з датчиками деформації; 7) вуглеграфітовий електрод; 8) потенціостат-гальваностат MTech SPG-500; 9) 0,1% розчин NaCl; P – навантаження; S – напрямок руху столика

використовуючи насичений електрод порівняння Ag/AgCl та вуглеграфітовий допоміжний електрод.

Характеристики рельєфу поверхні тертя зразків у досліджуваних розчинах визначали за допомогою безконтактного тривимірного інтерференційного профілометра Micron-Alpha. Морфологію доріжки тертя алюмінієвого сплаву досліджували за допомогою сканівного електронного мікроскопа EVO 40XVP із системою енергодисперсійного мікроаналізу INCA Energy 350.

Результати та їх обговорення

На рис. 2 надано залежність зміни електродного потенціалу алюмінієвого сплаву до та під час тертя в корозивному та інгібованих розчинах. Встановлено, що на початку випробувань потенціал неактивованого алюмінієвого сплаву знаходився в діапазоні −470...−520 мВ. Під час прикладання до поверхні металу сталого навантаження електродний потенціал зразка зміщується до більш негативних значень, що свідчить про появу в зоні треку зношування електрохімічно активної поверхні металу. У неінгібованому розчині (рис. 2, крива 1) спостерігається найбільш різке зниження потенціалу до −880 мВ. Введення натрій альгінату у хлоридний розчин забезпечує менше відхилення потенціалу від стаціонарного значення (−630 мВ). За інгібування корозивного розчину композицією на основі натрій альгінату та цинк ацетату (рис. 2, крива 3) спостерігається незначне зниження потенціалу, який залишається стабільним протягом усього часу тертя, що вказує на швидке відновлення на поверхні металу захисної плівки з покращеними захисними властивостями.

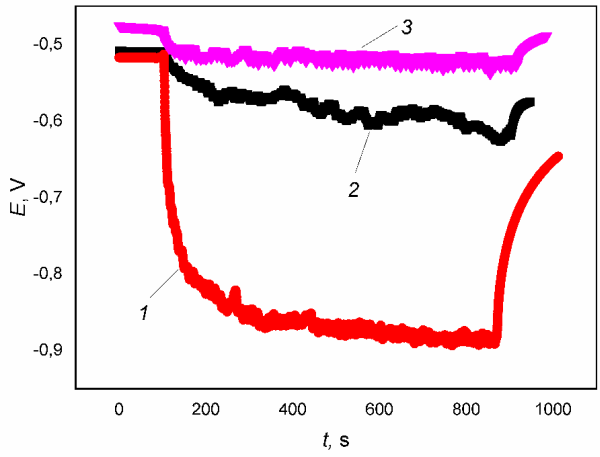


Рис. 2. Зміна електродного потенціалу алюмінієвого сплаву до та під час тертя у 1 – неінгібованому розчині та за додавання: 2 – натрію альгінату; 3 – композиції натрій альгінату та цинк ацетату

Порівняння коефіцієнтів тертя пари «корундова кулька–алюмінієвий сплав Д16Т» у контрольному та інгібованих розчинах свідчить, що оксидна плівка має найгірші антифрикційні властивості та є менш стійкою до механічного руйнування (рис. 3). У неінгібованому розчині коефіцієнт тертя зростав до 0,72, причому його зміна носила стрибкоподібний характер із численними флуктуаціями, спричиненими схоплюванням та утворенням задирів. У розчині, інгібованому композицією на основі натрій альгінату та цинк ацетату, коефіцієнт тертя знизився до 0,35, що приблизно вдвічі менше порівняно з неінгібованим середовищем. Таке зниження, ймовірно, пов'язане з формуванням на поверхні доріжки зношування захисної плівки, яка складається з алюміній–альгінатних комплексів та нерозчинних гідроксидів цинку [11,12].

На рис. 4 (*а, б*) показано часові залежності струму поляризації зразків алюмінієвого сплаву під час тертя в хлоридному та інгібованих розчинах. Виявлено, що у неінгібованому середовищі (крива 1) струм поляризації під час тертя різко зростав і досягав максимального значення близько 0,028 мА. Це свідчить про активацію корозійного процесу під впливом механічного навантаження, внаслідок порушення захисного оксидного шару та посиленого анодного розчинення металу. Застосування натрій альгінату (рис. 4, крива 2) спричиняє зменшення струму поляризації, пікове значення якого становить близько 0,011 мА, що вказує на часткове при-

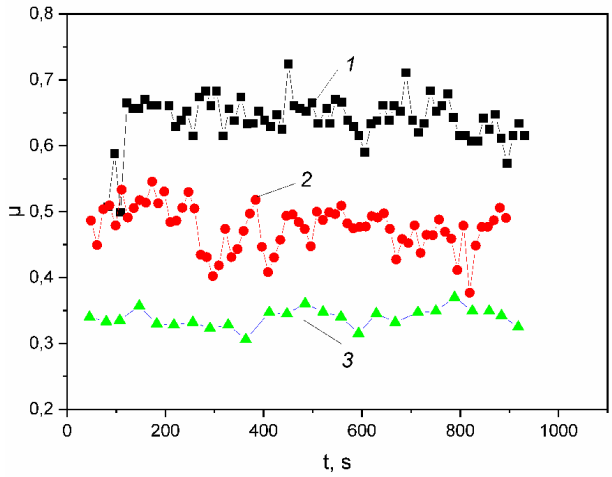


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тертя пари «корундова кулька–алюмінієвий сплав» від часу ковзання в неінгібованому розчині (1) та інгібованому: 2 – натрій альгінатом; 3 –композицією натрій альгінату та цинк ацетату

гнічення корозії завдяки утворенню захисної плівки на поверхні зразка. Найнижчі значення струму (не більше 0,010 мА) спостерігали в інгібованому середовищі за використання композиції натрій альгінату та цинк ацетату (рис. 4, крива 3), що свідчить про уповільнення іонізації металу під час трибокорозії внаслідок формування на поверхні сплаву стабільної захисної плівки.

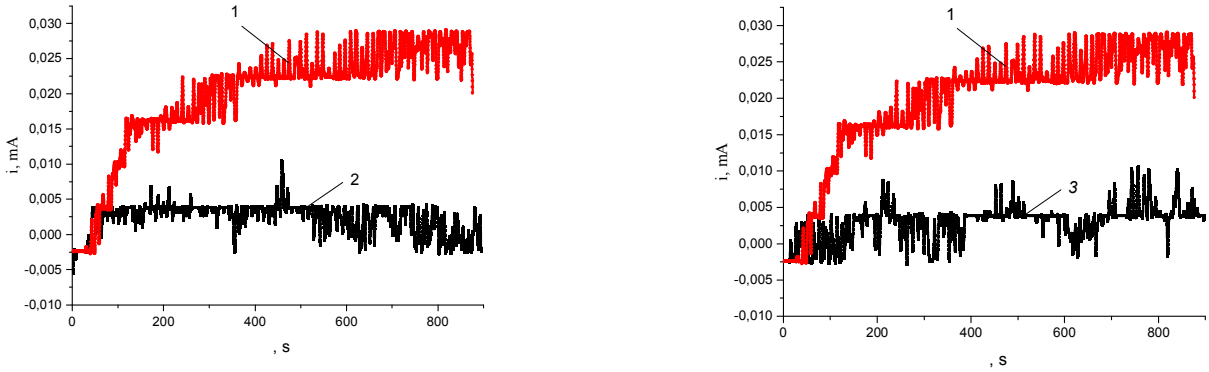
Кількісні характеристики шорсткості поверхні тертя сплаву Д16Т оцінювали за допомогою оптичного приладу з вбудованою програмою «Micron-alpha». Зокрема, визначали усереднені значення параметрів шорсткості профілю поверхні тертя на п'яти її ділянках (рис. 5). Встановлено, що після тертя сплаву в 0,1%-му розчині NaCl поверхня характеризується значними пошкодженнями, глибокими подряпинами та розривами, що свідчить про інтенсивний знос металу. Середнє арифметичне відхилення профілю R_a становить 0,972 мкм, а висота нерівностей R_z – 4,145 мкм. Після тертя сплаву в інгібованому розчині альгінату натрію профіль поверхні є більш згладженим, з меншою глибиною мікротріщин; параметри шорсткості становлять R_a=0,53 мкм і R_z=2,36 мкм, що вказує на часткове пригнічення корозійно-механічного руйнування. Найгладкішу поверхню зі шорсткістю R_a=0,49 мкм і R_z=1,98 мкм отримано після тертя в інгібованому середовищі з композицією натрій альгінату та цинк ацетату. Мінімальні значення шорсткості та рівномірна поверхнева структура свідчать про синергічну взаємодію компонентів композиції, які ефективно знижують швидкість зношування металу.

Аналіз зразків після трибологічних випробувань за допомогою сканувального електронного мікроскопа (рис. 6) показав, що у неінгібованому хлоридному розчині поверхня сплаву зазнала найбільших пошкоджень. Поверхня зношування вкрита численними глибокими борознами, що виникають унаслідок руйнування оксидної плівки. При цьому ширина доріжки тертя є максимальною (рис. 7), що свідчить про значні втрати металу внаслідок поєднання абразивного та корозійного зношування. За інгібування хлоридного розчину альгінатом натрію ширина доріжки тертя зменшується майже у 1,5 раза (рис. 7), що вказує на зниження інтенсивності зношування. Поверхня стає більш однорідною, а глибина борозен – меншою. Найменшу ширину доріжки зношування (≈320 мкм) зафіксовано після тертя в хлоридному середовищі, що містило композицію натрій альгінату та цинк ацетату.

У зоні доріжки зношування (табл.) у середовищі 0,1% NaCl поверхня характеризується високим вмістом алюмінію (81,08 мас.%), що свідчить про інтенсивне руйнування оксидного шару та оголення металевої основи. У складі також виявлено незначну кількість хлору (1,28 мас.%), що, ймовірно, пов'язано з утворенням хлоридів алюмінію. Поверхня доріжки зношування після тертя в розчині, інгібованому натрій альгінатом, окрім алюмінію, містить значну кількість вуглецю (10,16 мас.%) і кисню (15,18 мас.%), що вказує на формування органічної плівки на поверхні металу. У разі інгібування корозійного середовища композицією у складі поверхневої плівки додатково зафіксовано присутність цинку, що підтверджує його участь у формуванні захисного шару.

Висновки

Досліджено захисні властивості композиції натрій альгінату та цинк ацетату на поверхні дюралюмінію в корозійному середовищі за умов ме-



а б

Рис. 4. Часові залежності струму поляризації для зразків алюмінієвого сплаву під час їх корозійного зношування у хлоридному розчині (крива 1) та за додавання: 2 – натрій альгінату; 3 – композиції на основі натрій альгінату та цинк ацетату

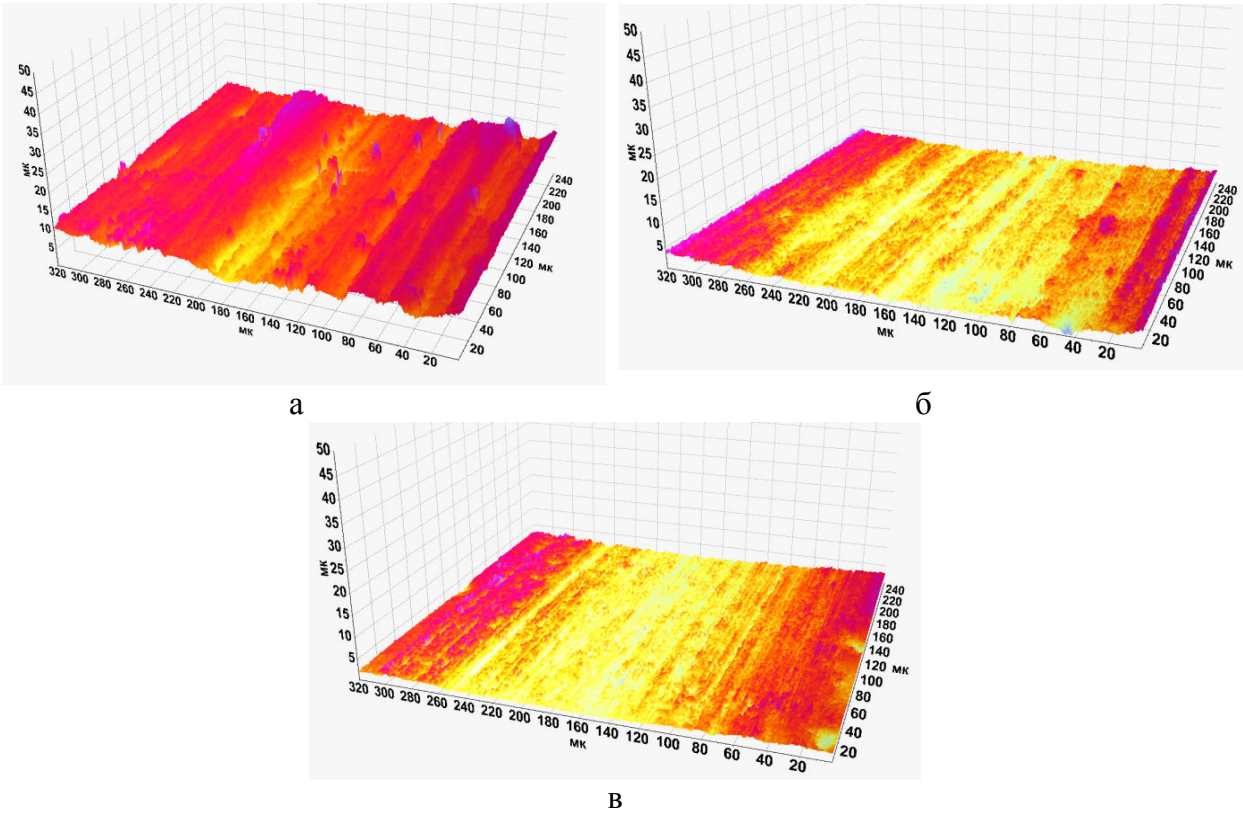


Рис. 5. 3D-профілограми поверхні тертя сплаву Д16Т у неінгібованому розчині натрій хлориду (*а*) та в інгібованому натрій альгінатом (*б*) і композицією натрій альгінату та цинк ацетату (*в*)

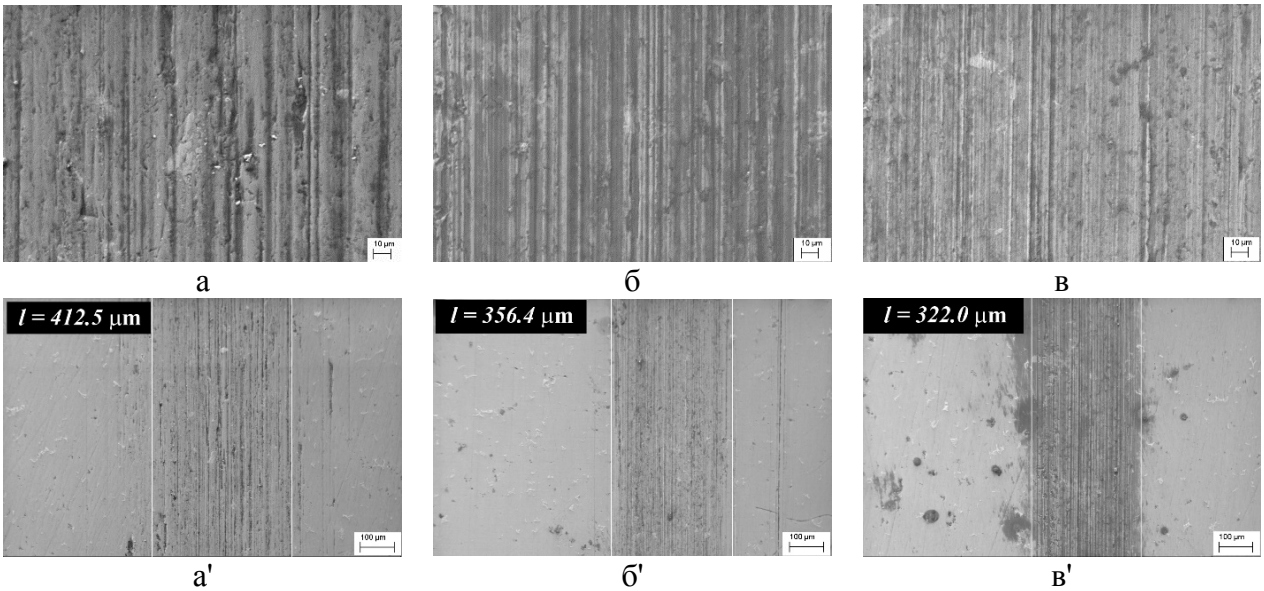


Рис. 6. Морфологія поверхні та ширина доріжки (*l*) тертя сплаву Д16Т при збільшенні ×500 (а–в) та ×100 (а'–в'): у неінгібованому розчині натрій хлориду (а, а'); в інгібованому натрій альгінатом (б, б'); в інгібованому композицією натрій альгінату та цинк ацетату (в, в')

ханічної активації. Встановлено, що інгібування розчину цією композицією приводить до зниження значень струму поляризації приблизно у три рази порівняно з контрольним розчином, що свідчить про сповільнення іонізації металу під час трибокорозії внаслідок формування на поверхні сплаву захисної плівки. Порівняння коефіцієнтів тертя пари «корундова кулька–алюмінієвий сплав Д16Т» у контрольному та інгібованих розчинах показало, що органо-неорганічна плівка характеризується кращими антифрикційними властивостями та вищою механічною стійкістю порівняно з оксидною. Отримані результати свідчать, що досліджувана композиція є перспективною для захисту конструкцій з алюмінієвих сплавів, які експлуатуються в умовах корозійно-механічного руйнування.

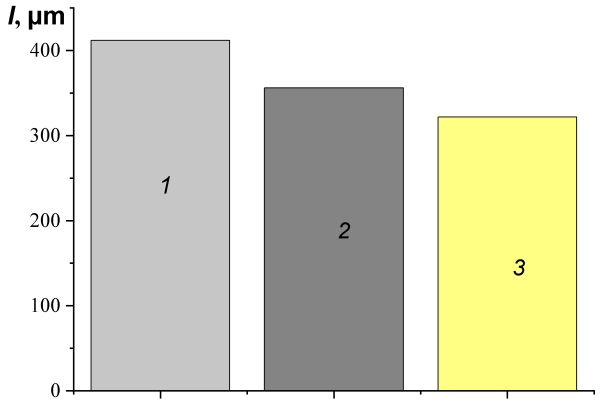


Рис. 7. Ширина доріжки зносу сплаву Д16Т у неінгібованому розчині натрій хлориду (*1*) та за додавання: 2 – натрій альгінату; 3 – композиції натрій альгінату та цинк ацетату

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Tahkashi H., Chiba M.* Role of anodic oxide films in the corrosion of aluminum and its alloys // Corros. Rev. – 2018. – Vol.36. – No. 1. – P.35-54.

2. *A review* on tribocorrosion behavior of aluminum alloys: from fundamental mechanisms to alloy design strategies / Zhang Z., Dandu R.S.B., Klu E.E., Cai W. // Corros. Mater. Degrad. – 2023. – Vol.4. – No. 4. – P.594-622.

3. *Abolusoro O.P., Akinlabi E.T.* Tribocorrosion measurements and behaviour in aluminium alloys: an overview // J. Bio Tribo Corros. – 2020. – Vol.6. – Art. No. 102.

4. *Chen J., Mraied H., Cai W.* Determining tribocorrosion rate and wear-corrosion synergy of bulk and thin film aluminum alloys // J. Vis. Exp. – 2018. – Vol.139. – Art. No. 58235.

5. *Effect* of sodium octanoate on the tribocorrosion behaviour of 5052 aluminium alloy / Zhao H., Cao L., Wan Y., Pu J. // Tribol. Mater. Surf. Interfaces. – 2018. – Vol.12. – No. 4. – P.200-207.

6. *Corrosive* wear of aluminium alloy in presence of phosphate / Pokhmurskii V.I., Zin I.M., Vynar V.A., Khlopyk O.P., Bily L.M. // Corros. Eng. Sci. Technol. – 2012. – Vol.47. – No. 3. – P.182-187.

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу поверхні сплаву Д16Т після трибокорозії в досліджуваних розчинах (в зоні/поза зоною доріжки зношування)

Елемент	Вміст, мас.%		
	середовище		
	0,1% NaCl	0,1% NaCl+натрій альгінат	0,1% NaCl+композиція натрій альгінату та цинк ацетату
Al	81,08/87,92	68,31/81,74	72,00/78,93
Mg	0,32/0,68	0,20/0,44	0,41/0,46
Zn	–	–	0,09/0,11
C	–	10,16/7,11	6,88/8,12
O	11,8/5,48	15,18/5,01	14,79/7,11
Na	0,11/–	0,16/–	–
Cu	4,67/4,96	4,12/5,02	4,23/4,67
Cl	1,28/0,26	1,16/0,20	0,87/0,13
Fe	0,26/0,14	0,03/0,23	0,43/0,1
Mn	0,36/0,47	0,57/0,15	0,26/0,27
Si	0,12/0,09	0,12/0,10	0,05/0,10

7. *Novel* sustainable corrosion inhibitors for enhancing carbon steel corrosion resistance based on clay and lignin biopolymer extracted from raw Alfa fibers / Akachar S., AitAghzzaf A., Zarki Y., Idouhli R., Azaryouh L., El Achaby M., Draoui K. // Mater. Sci. – 2024. – Vol.59. – P.17927-17944.

8. *Recent* progress of polymeric corrosion inhibitor: structure and application / Wang X., Liu S., Yan J., Zhang J., Zhang Q., Yan Y. // Materials. – 2023. – Vol.16. – No. 8. – Art. No. 2954.

9. *Corrosion* inhibition of aluminum alloy by a composition of guar gum and tartrate / Tymus M.B., Zin I.M., Khlopyk O.P., Pokhmurskii V.I., Holovchuk M.Ya., Korniy S.A. // Mater. Sci. – 2022. – Vol.57. – No. 5. – P.679-687.

10. *Alginate* biopolymer as green corrosion inhibitor for copper in 1 M hydrochloric acid: Experimental and theoretical approaches / Jmiai A., El Ibrahimi B., Tara A., El Issami S., Jbara O., Bazzi L. // J. Mol. Struct. – 2018. – Vol.1157. – P.408-417.

11. *Zaafarany I.A.* Non-isothermal decomposition of al, cr and fe cross-linked trivalent metal-alginate complexes // J. King Abdulaziz Univ. Sci. – 2010. – Vol.22. – No. 1. – P.193-202.

12. *Corrosion* inhibition of D16T aluminum alloy by sodium alginate and zinc acetate composition in neutral chloride-containing environment / Korniy S.A., Zin I.M., Khlopyk O.P., Sobodosh N.Yo. // Mater. Sci. – 2024. – Vol.60. – No. 2. – P.109-116.

Надійшла до редакції 05.08.2025

EFFECT OF AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY INHIBITOR COMPOSITION BASED ON SODIUM ALGINATE AND ZINC ACETATE ON THE TRIBOCORROSION BEHAVIOR OF AN ALUMINUM ALLOY

S.A. Korniy *, I.M. Zin, N.Y. Sobodosh, O.P. Khlopyk, N.B. Ratska, B.M. Datsko

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

*** e-mail: korniy_sergiy@ukr.net**

The effect of an environmentally friendly inhibitory composition based on sodium alginate and zinc acetate on the corrosion–mechanical wear of D16T aluminum alloy in a chloride-containing medium was investigated. It was found that, under friction conditions, this composition promotes the formation of a protective film on the alloy surface with improved antifriction properties and enhanced mechanical stability compared with the natural oxide film. This results in approximately a twofold reduction in the friction coefficient and a threefold decrease in the polarization current, indicating effective suppression of metal ionization processes and reduced wear intensity. Based on scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy results, it was assumed that the protective layer consists of aluminum–alginate complexes and zinc compounds that prevent corrosion–mechanical degradation. The formation of a smooth surface with minimal damage in the inhibited medium was confirmed by three-dimensional profilometry.

Keywords: aluminum alloy; tribocorrosion; mechanical activation; friction coefficient; inhibitor composition; sodium alginate; zinc acetate.

REFERENCES

1. Tahkashi H, Chiba M. Role of anodic oxide films in the corrosion of aluminum and its alloys. *Corros Rev*. 2018; 36(1): 35-54. doi: 10.1515/corrrev-2017-0048.

2. Zhang Z, Dandu RSB, Klu EE, Cai W. A review on tribocorrosion behavior of aluminum alloys: from fundamental mechanisms to alloy design strategies. *Corros Mater Degrad*. 2023; 4: 594-622. doi: 10.3390/cmd4040031.

3. Abolusoro OP, Akinlabi ET. Tribocorrosion measurements and behaviour in aluminium alloys: an overview. *J Bio Tribo Corros*. 2020; 6: 102. doi: 10.1007/s40735-020-00393-4.

4. Chen J, Mraied H, Cai W. Determining tribocorrosion rate and wear-corrosion synergy of bulk and thin film aluminum alloys. *J Vis Exp*. 2018; 139: 58235. doi: 10.3791/58235.

5. Zhao H, Cao L, Wan Y, Pu J. Effect of sodium octanoate on the tribocorrosion behaviour of 5052 aluminium alloy. *Tribol Mater Surf Interfaces*. 2018; 12(4): 200-207. doi: 10.1080/17515831.2018.1531651.

6. Pokhmurskii VI, Zin IM, Vynar VA, Khlopyk OP, Bily LM. Corrosive wear of aluminium alloy in presence of phosphate. *Corros Eng Sci Technol*. 2012; 47(3): 182-187. doi: 10.1179/1743278211Y.0000000022.

7. Akachar S, AitAghzzaf A, Zarki Y, Idouhli R, Azaryouh L, El Achaby M, et al. Novel sustainable corrosion inhibitors for enhancing carbon steel corrosion resistance based on clay and lignin biopolymer extracted from raw Alfa fibers. *Mater Sci*. 2024; 59: 17927-17944. doi: 10.1007/s10853-024-09873-1.

8. Wang X, Liu S, Yan J, Zhang J, Zhang Q, Yan Y. Recent progress of polymeric corrosion inhibitor: structure and application. *Materials*. 2023; 16(8): 2954. doi: 10.3390/ma16082954.

9. Tymus MB, Zin IM, Khlopyk OP, Pokhmurskii VI, Holovchuk MYa, Korniy SA. Corrosion inhibition of aluminum alloy by a composition of guar gum and tartrate. *Mater Sci*. 2022; 57: 679-687. doi: 10.1007/s11003-022-00595-w.

10. Jmiai A, El Ibrahimi B, Tara A, El Issami S, Jbara O, Bazzi L. Alginate biopolymer as green corrosion inhibitor for copper in 1 M hydrochloric acid: experimental and theoretical approaches. *J Mol Struct*. 2018; 1157: 408-417. doi: 10.1016/j.molstruc.2017.12.060.

11. Zaafarany IA. Non-isothermal decomposition of Al, Cr and Fe cross-linked trivalent metal-alginate complexes. *J King Abdulaziz Univ Sci*. 2010; 22(1): 193-202. doi: 10.4197/Sci.22-1.13.

12. Korniy SA, Zin IM, Khlopyk OP, Sobodosh NY. Corrosion inhibition of D16T aluminum alloy by sodium alginate and zinc acetate composition in neutral chloride-containing environment. *Mater Sci*. 2024; 60: 109-116. doi: 10.1007/s11003-025-00860-8.