

УДК 620.197

С.А. Корній ^а, І.М. Зінь ^{а, б}, М.-О.М. Даниляк ^а, О.П. Хлопик ^а, В.С. Проценко ^в,
Л.М. Білий ^а, М.Я. Головчук ^а, Я.І. Зінь ^а

ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ ОДЕРЖАНИХ МЕХАНОХІМІЧНО ЦЕОЛІТ/ ФОСФАТНИХ ПРОТИКОРОЗІЙНИХ ПІГМЕНТІВ ДЛЯ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ

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

^б Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

^в ДВНЗ Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро, Україна

Механохімічним методом отримано екологічно безпечні протикорозійні пігменти на основі синтетичного цеоліту та фосфатів цинку та кальцію. Методом сканівної електронної мікроскопії та енергодисперсійної спектроскопії визначено морфологію поверхні та хімічний склад одержаних композиційних пігментів. Встановлено, що модифікація цеоліту фосфатами двовалентних металів зумовлює зменшення розміру частинок і збільшення питомої поверхні отриманих пігментів. Показано, що використання композиційних цеоліт/фосфатних пігментів підвищує корозійну тривкість алюмінієвого сплаву у 0,1% розчині NaCl. Додавання в розчин натрій хлориду комплексних цеоліт/фосфатних пігментів сповільнює анодний процес електрохімічної корозії, що свідчить про формування на поверхні металу захисної плівки. Найбільшу протикорозійну дію проявляє композиційний пігмент цеоліт/Zn(H₂PO₄)₂. Отримані результати свідчать про можливість поступового вивільнення з пігментів лакофарбових покриттів інгібуючих компонентів, що забезпечує їх довготривалу дію для захисту металевих виробів.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, корозійна тривкість, цеоліт, фосфати цинку та кальцію, механохімічна модифікація, інгібувальні пігменти.

DOI: 10.32434/0321-4095-2021-136-3-107-112

Вступ

Корозія металів і сплавів є актуальною проблемою у багатьох галузях народного господарства [1]. Найбільш поширеним та ефективним методом протикорозійного захисту металевих виробів є нанесення лакофарбових покриттів [2,3]. Механізм їх захисної дії полягає у пригніченні реакцій електрохімічної корозії внаслідок блокування доступу корозивного середовища до металу та додавання до складу лакофарбового зв'язуючого інгібувальних пігментів [4–6]. До найефективніших інгібувальних пігментів відносять хромати. Однак їх використання в економічно розвинутих країнах поступово обмежується через високу токсичність і екологічну небезпечність. Перспективним напрямом є пошук екологічно чистих замінників шестивалентного хрому для органічних покриттів, які б мали високу протикорозійну ефективність [7].

Альтернативою антикорозійним токсичним пігментам може бути фосфат цинку, який використовується в алкідних, епоксидних та інших ґрунтувальних лакофарбових покриттях [8,9]. Однак фосфати самі по собі мають недостатні захисні властивості і потребують модифікації. Встановлено, що їх інгібувальну дію можна посилити суміщенням в одній композиції з цеолітом [10].

Метою даної роботи є дослідження корозійної тривкості алюмінієвого сплаву у присутності екологічно безпечних цеоліт/фосфатних пігментів, одержаних механохімічною модифікацією.

Методика експерименту

Досліджували композиційні цеоліт/фосфатні пігменти, які отримували механохімічною модифікацією тривалістю 1 год у високоенергетичному планетарному млині Retsch PM 100.

Швидкість обертання циліндра млина становила 100 об./хв. Після диспергування вихідний цеоліт одержав дрібнодисперсну форму частинок із розмірами, меншими за 5–6 мкм. Одержували пігменти «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ » та «цеоліт/ $CaHPO_4$ ». Масове співвідношення в помольній суміші між цинк фосфатом однозаміщеним або кальцій фосфатом двозаміщеним та цеолітом NaA становило 1 до 4. Композиційні пігменти з концентрацією 1 г/л додавали в 0,1% розчин NaCl, утворюючи суспензію. Суспензії пігментів в корозивному розчині настоювали впродовж 3 годин. Корозійну тривкість зразків алюмінієвого сплаву D16T у 0,1% розчині NaCl з додаванням цеоліт/фосфатних пігментів за умов природної аерації розчину, досліджували методами потенціометрії та потенціодинамічної поляризації, використовуючи потенціостат MTech COR-500, насичений електрод порівняння Ag/AgCl та допоміжний платиновий електрод. Швидкість сканування потенціалу під час експериментів становила 1 мВ/с. Робоча площа зразка алюмінієвого сплаву – 1 см². Потенціали робочих електродів вимірювали проти насиченого хлоридсрібного електрода порівняння і перераховували на нормальну водневу шкалу. Дослідження цих же зразків алюмінієвого сплаву здійснювали методом електрохімічної імпедансної спектроскопії з використанням потенціостата Gill AC, а також насиченого Ag/AgCl та платинового допоміжного електродів у діапазоні частот змінного струму від 1000 до 0,01 Гц з амплітудою сигналу 10 мВ.

Дослідження методами потенціодинамічної поляризації та електрохімічної імпедансної спектроскопії проводили саме у суспензіях екологічно безпечних пігментів з метою оцінки лише інгібувальної дії пігменту, на відміну від досліджень в яких пігменти вводять у полімерні покриття, де окрім інгібувальної дії також відбувається блокування доступу корозійного середовища до поверхні металу.

Морфологію поверхні цеолітних пігментів та їх елементний склад вивчали на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP із системою мікроаналізу INCA Energy 350.

Результати та обговорення

Самочинний процес іонізації алюмінієвого сплаву D16T досліджено методом потенціометрії у 0,1% водному розчині NaCl з додаванням інгібувальних пігментів, фіксуючи потенціал відкритого кола (E) (рис. 1). Поверхня алюмінієвого сплаву у 0,1% розчині NaCl та у розчинах з додаванням пігментів починає стабілізуватися вже з перших 6–10 хв, про що свідчить незмінність значення вільного потенціалу. З отриманих результатів видно, що значення цього потенціалу сплаву D16T знаходиться у межах –0,33 ... –0,36 В незалежно від складу розчину.

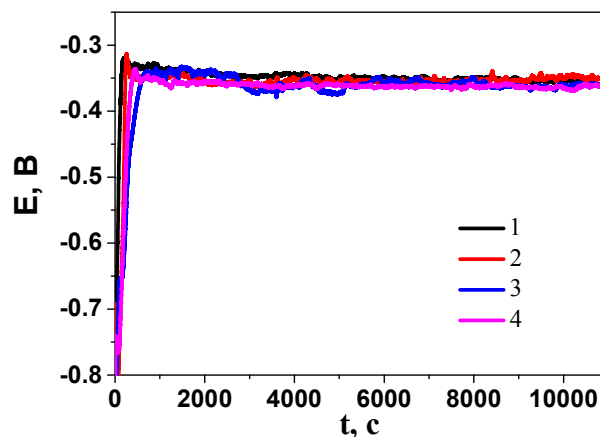


Рис. 1. Часові залежності потенціалу корозії алюмінієвого сплаву D16T у розчинах: 1 – 0,1% NaCl; 2 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л цеоліту; 3 – 0,1% NaCl з додаванням пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ »; 4 – 0,1% NaCl з додаванням пігменту «цеоліт/ $CaHPO_4$ »

зуватись вже з перших 6–10 хв, про що свідчить незмінність значення вільного потенціалу. З отриманих результатів видно, що значення цього потенціалу сплаву D16T знаходиться у межах –0,33 ... –0,36 В незалежно від складу розчину.

На рис. 2 наведено поляризаційні криві алюмінієвого сплаву D16T у 0,1% розчині NaCl та у розчинах з додаванням пігментів, за даними яких визначали потенціал ($E_{кор}$) та струм ($i_{кор}$) корозії. $E_{кор}$ та $i_{кор}$ сплаву D16T у вихідному 0,1% розчині NaCl становлять –0,32 В та $0,45 \cdot 10^{-2}$ мА/см², відповідно (табл. 1). Корозійна тривкість алюмінієвого сплаву у суспензіях цеоліт/фосфатних пігментів збільшується приблизно в 6–15 разів порівняно з неінгібованим корозійним середовищем. Потенціали та струми корозії алюмінієвого сплаву в інгібованих 0,1% розчинах NaCl знаходились у діапазоні –0,23 ... –0,30 В та $(0,03 \dots 0,22) \cdot 10^{-2}$ мА/см², відповідно.

У корозивних середовищах без інгібіторів та з додаванням не модифікованого цеоліту спостерігали певне утруднення протікання катодного процесу на алюмінієвому сплаві, найбільш імовірно спричинене обмеженням дифузії кисню, в той час, як швидкість анодної реакції залишалася високою. При додаванні в корозивний розчин комплексних цеоліт/фосфатних пігментів додатково сповільнювався анодний процес електрохімічної корозії, що може свідчити про формування на поверхні металу захисної плівки. Раніше в роботі [11] методом рентгено-спектрального мікроаналізу встановлено утворення фосфатної плівки на анодних ділянках

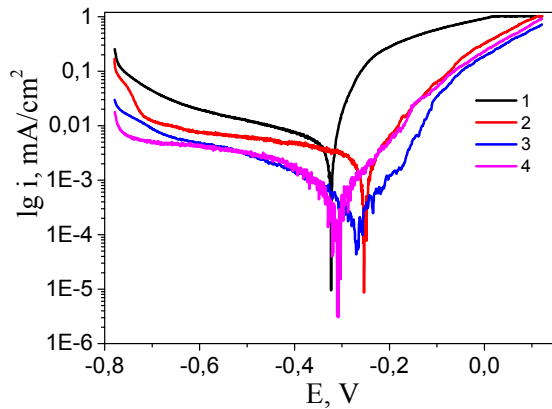


Рис. 2. Поляризаційні криві алюмінієвого сплаву Д16Т у розчинах: 1 – 0,1% NaCl; 2 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л цеоліту; 3 – 0,1% NaCl з додаванням пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ »; 4 – 0,1% NaCl з додаванням пігменту «цеоліт/ $CaHPO_4$ »

алюмінієвого сплаву в суспензії цинк фосфату в корозивному середовищі. При цьому композиційний пігмент «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ » має вищу протикорозійну ефективність, ніж подрібнений цеоліт NaA та механохімічно модифікований матеріал «цеоліт/ $CaHPO_4$ », що можна пояснити здатністю катіонів Zn^{2+} до утворення малорозчинних гідроксидів, які осаджуються на поверхні сплаву.

Протикорозійна дія цеолітів визначається сорбційними та іонообмінними властивостями, які в свою чергу залежать від їхнього хімічного складу та морфології поверхні. Тому дослідження поверхні цеолітів методом сканівної електронної мікроскопії є доцільним для прогнозування їх фізико-хімічних властивостей. На рис. 3 наведені мікрофотографії цеоліту, де зафіксовано відносно неоднорідну структуру досліджуваних матеріалів. Додавання фосфатів не викли-

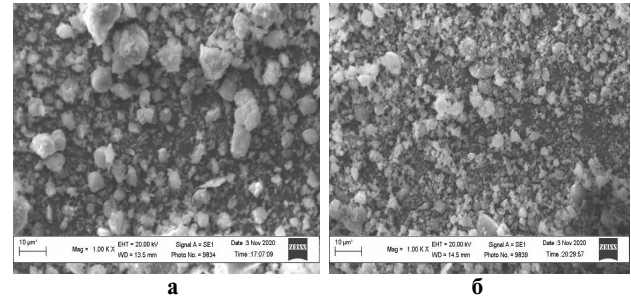


Рис. 3. Електронні мікрофотографії пігментів: цеоліту (а) та цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ (б)

кає суттєвої зміни морфології поверхні. При цьому розмір частинок чистого цеоліту становить 5–6 мкм, а модифікованого цинк фосфатом – знаходиться в межах 2–3 мкм. Фосфати цинку та кальцію утворюють в композиційному пігменті інгібіторну фазу. Підвищення протикорозійної ефективності композиційних пігментів також відбувається завдяки зменшенню їх розміру і високій питомій поверхні. Ймовірно, в процесі механохімічної модифікації фосфат частково заповнює нанопористу цеолітну матрицю. При цьому інтеркальована фосфатна фаза може мати кращі інгібувальні властивості стосовно корозії алюмінієвого сплаву, ніж відомі цинкфосфатні інгібувальні пігменти.

З результатів енергодисперсійної спектроскопії випливає (табл. 2), що розподіл елементів, які утворюють каркас цеолітів є доволі однорідним, та характеризує цеоліт, як перспективний технічний матеріал. Дані енергодисперсійної спектроскопії аналізу свідчать про наявність у складі композиційних пігментів фосфору, цинку та кальцію.

Результати електрохімічної імпедансної спектроскопії (рис. 4) свідчать, що корозійна тривкість алюмінієвого сплаву під впливом це-

Таблиця 1
Електрохімічні характеристики алюмінієвого сплаву Д16Т в інгібованих корозивних розчинах

Середовище	$E_{\text{кор}}, \text{В}$	$i_{\text{кор}}, \text{мА/см}^2$
0,1% NaCl	-0,32	$0,45 \cdot 10^{-2}$
0,1% NaCl з додаванням цеоліту	-0,26	$0,22 \cdot 10^{-2}$
0,1% NaCl з додаванням пігменту "цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ "	-0,27	$0,03 \cdot 10^{-2}$
0,1% NaCl з додаванням пігменту "цеоліт/ $CaHPO_4$ "	-0,30	$0,07 \cdot 10^{-2}$

Таблиця 2

Вміст елементів (мас.%) у цеоліт/фосфатних пігментах

Склад пігментів	C	O	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	P	Zn
цеоліт	16,42	45,03	9,39	12,83	15,44	0,22	0,15	0,19	0,43	–	–
цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$	11,95	48,20	9,99	13,69	16,97	0,22	0,16	0,20	0,29	1,70	2,84
цеоліт/ $CaHPO_4$	17,69	45,50	7,55	9,52	12,05	0,16	5,08	–	–	2,25	–

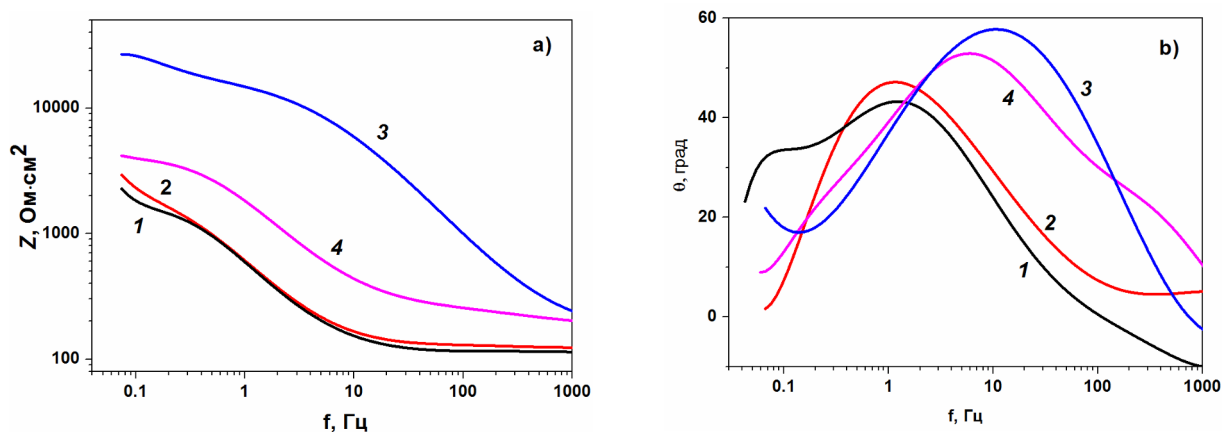


Рис. 4. Частотні залежності модуля імпедансу (а) та фазового кута (б) при корозії алюмінієвого сплаву Д16Т після 24 годин витримки у розчинах: 1 – 0,1% NaCl; 2 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л цеоліту; 3 – 0,1% NaCl з додаванням пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ »; 4 – 0,1% NaCl з додаванням пігменту «цеоліт/ $CaHPO_4$ »

оліт/фосфатних пігментів збільшується в $\sim 1,5$ –12 разів при частоті 0,1 Гц. При цьому їх протикорозійна ефективність у 0,1% розчині NaCl є вищою, ніж у звичайного і подрібненого в планетарному млині цеоліту. Електрохімічний імпеданс у 0,1% розчині NaCl, що містить композиційний пігмент цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$, є найвищим і становить $3 \cdot 10^4$ Ом·см², що вказує на найбільшу ефективність цього інгібітору порівняно з дослідженим композиційним пігментом на основі «цеоліт/ $CaHPO_4$ ».

Зміщення максимуму фазового кута в діапазон низьких частот у неінгібованому 0,1% розчині хлориду натрію можна пояснити дією агресивних хлорид-іонів на покритий оксидною плівкою алюмінієвий сплав (рис. 4,б) [12]. Поява низькочастотного максимуму фазового кута характерна для процесу пітингової корозії [13,14]. Однак імпедансні діаграми алюмінієвого сплаву в інгібованих розчинах демонструють максимум фазового кута при високих частотах (рис. 4,б). Це характерно для алюмінієвих сплавів із поверхневими бар'єрними плівками, які виникають під дією інгібіторів корозії [13].

Для оцінки впливу механохімічної модифікації на інгібувальні властивості протикорозійних пігментів досліджували поляризаційні характеристики алюмінієвого сплаву суспензіях цеоліту, монофосфату цинку, простої суміші «цеоліт+монофосфат цинку» та одержаного механохімічно пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ » (рис. 5). У суспензіях цеоліту та монофосфату цинку, взятих окремо, катодні та анодні поляризаційні струми найвищі. При цьому катодна реакція дещо сповільнена. В суспензії пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ » спостерігається сильний

змішаний катодно-анодний контроль електрохімічної корозії алюмінієвого сплаву. Абсолютні значення струмів катодної та анодної поляризації тут мінімальні. В умовах дії простої суміші цеоліту з монофосфатом цинку переважає катодний контроль корозії, а анодні струми за своїми значеннями близькі до таких в індивідуальних суспензіях монофосфату цинку та цеоліту. Таким чином, механохімічна модифікація забезпечує підвищені протикорозійні властивості пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ » за рахунок значного сповільнення анодної реакції у порівнянні з одночасним додаванням монофосфату та цеоліту в корозивний розчин.

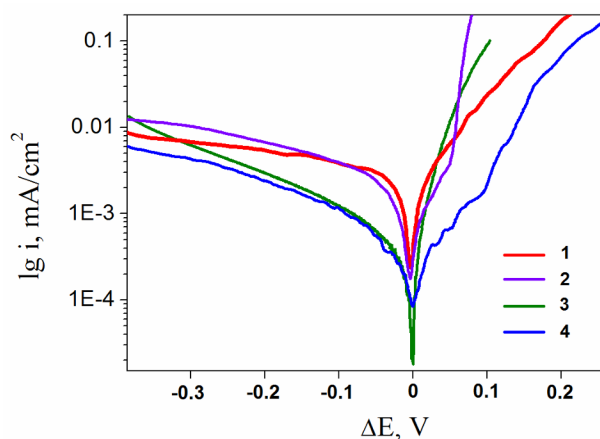


Рис. 5. Поляризаційні криві алюмінієвого сплаву Д16Т у розчинах: 1 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л цеоліту; 2 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л монофосфату цинку; 3 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л простої суміші «цеоліт+ $Zn(H_2PO_4)_2$ »; 4 – 0,1% NaCl з додаванням 1 г/л пігменту «цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$ »

Висновки

Методом механохімічної модифікації одержано композиційні пігменти на основі синтетичного цеоліту та цинк та кальцію фосфатів. За допомогою сканівної електронної мікроскопії та енергодисперсійної рентгеноспектроскопії досліджено морфологію їх поверхні та встановлено наявність у їх складі фосфору, кальцію та цинку. Механохімічна модифікація цеоліту забезпечує утворення екологічно безпечних композиційних пігментів, які складаються з нанопористої алюмосилікатної матриці та включень фосфатної фази. Додавання цеоліт/фосфатних пігментів до 0,1% розчину NaCl суттєво зменшує корозію алюмінієвого сплаву. Найбільшу протикорозійну ефективність має композиційний пігмент цеоліт/ $Zn(H_2PO_4)_2$. Повільне вивільнення з цих пігментів фосфат аніонів та цинк і кальцій катіонів може забезпечити їх довготривалу інгібувальну дію у складі лакофарбових покриттів на металевих виробах.

Подяки

Робота виконана в рамках проекту № 2020.02/0063 «Синтез та властивості нових комплексних протикорозійних пігментів для лакофарбових покриттів на основі алюмосилікатних наноконтейнерів» Національного фонду досліджень України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *A one-step preparation of inhibitor-loaded silica nanocontainers for self-healing coatings* / Xu J.B., Cao Y.Q., Fang L., Hu J.M. // *Corros. Sci.* – 2018. – Vol.140. – P.349-362.
2. *Lyon S.B., Bingham R., Mills D.J.* Advances in corrosion protection by organic coatings: what we know and what we would like to know // *Prog. Org. Coat.* – 2017. – Vol.102. – P.2-7.
3. *Influence of the surface chemical treatment of D16T alloy on the protective properties of alkyd coatings* / Zin' I.M., Mardarevych R.S., Bilyi L.M., Kornii S.A., Duryagina Z.A. // *Mater. Sci.* – 2019. – Vol.55. – No. 2. – P.284-290.
4. *Kendig M.W.* Evaluation of corrosion inhibiting pigments // *ECS Trans.* – 2010. – Vol.24. – No. 1. – P.39-49.
5. *The application of anti-corrosion coating for preserving the value of equipment asset in chloride-laden environments: a review* / Qian Y., Li Y., Jungwirth S., Seely N., Fang Y., Shi X. // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2015. – Vol.10. – P.10756-10780.
6. *Hajkova T., Kalendova A.* The anticorrosion properties of pigments based on molybdates and tungstates surface-modified with conducting polymers // *Koroze a Ochrana Materialu.* – 2017. – Vol.61. – No. 1. – P.7-18.
7. *Whole pH range anti-corrosion property of aluminium alloy coated with MFI zeolite film* / Tsai S.T., ChangJean W.C., Chao P.H., Fu S.Y., Tsai T.C. // *Corros. Eng. Sci. Technol.* – 2018. – Vol.53. – P.34-38.
8. *The role of a zinc phosphate pigment in the corrosion of scratched epoxy-coated steel* / Shao Y., Jia C., Meng G., Zhang T., Wang F. // *Corros. Sci.* – 2009. – Vol.51. – P.371-379.
9. *Alibakhshi E., Ghasemi E., Mahdavian M.* Sodium zinc phosphate as a corrosion inhibitive pigment // *Prog. Org. Coat.* – 2014. – Vol.77. – P.1155-1162.
10. *Aluminium alloy corrosion inhibition by chromate free composition of zinc phosphate and ion exchanged zeolite* / Pokhmurskii V.I., Zin I.M., Bily L.M., Vynar V.A., Zin Y.I. // *Surf. Interface Anal.* – 2013. – Vol.45. – No. 10. – P.1474-1478.
11. *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.
12. *Investigation of the corrosion behaviour of AA 2024-T3 in low concentrated chloride media* / Queiroz F.M., Magnani M., Costa I., De Melo H.G. // *Corros. Sci.* – 2008. – Vol.50. – P.2646-2657.
13. *Microstructural and electrochemical characterization of environmentally friendly conversion layers on aluminium alloys* / Palomino L.E.M., De Castro J.F.W., Aoki I.V., De Melo H.G. // *J. Braz. Chem. Soc.* – 2003. – Vol.14. – No. 4. – P.651-659.
14. *Pitting and passivation of Al alloys and Al-based metal matrix composites* / Mansfeld F., Lin S., Kim S., Shih H. // *J. Electrochem. Soc.* – 1990. – Vol.137. – No. 1. – P.78-82.

Надійшла до редакції 18.02.2021

**PROTECTIVE PROPERTIES OF
MECHANOCHEMICALLY FABRICATED
ZEOLITE/PHOSPHATE ANTICORROSION PIGMENTS
FOR PAINT COATINGS**

S.A. Korniy ^{a,*}, I.M. Zin ^{a,b}, M.-O.M. Danyliak ^a,
O.P. Khlopyk ^a, V.S. Protsenko ^c, L.M. Bilyi ^a, M.Ya. Holovchuk ^a,
Ya.I. Zin ^a

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

^b Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

^c Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro,
Ukraine

* e-mail: korniy_sergiy@ukr.net

The anticorrosion environmentally friendly pigments based on synthetic zeolite and zinc and calcium phosphates were prepared by mechanochemical method. The surface morphology and chemical composition of the obtained pigments were determined by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy, respectively. It was established that the modification of zeolite by phosphates of divalent metals causes a decrease in the particle size and an increase in the specific surface area of the obtained composite pigments. It was shown that the use of zeolite/phosphate pigments increases the corrosion resistance of the aluminium alloy in 0.1% aqueous NaCl solution. The addition of complex zeolite/phosphate pigments to the sodium chloride solution decelerates the anodic process of electrochemical corrosion, which indicates the formation of a protective film on the metal surface. The composite pigment zeolite/Zn(H₂PO₄)₂ exhibited the highest anticorrosive effect. A gradual release of the inhibitory components from these environmentally friendly pigments provides their long-term action to protect metal products.

Keywords: aluminium alloy; corrosion resistance; zeolite; zinc and calcium phosphates; mechanochemical modification; inhibitory pigments.

REFERENCES

- Xu JB, Cao YQ, Fang L, Hu JM. A one-step preparation of inhibitor-loaded silica nanocontainers for self-healing coatings. *Corros Sci*. 2018; 140: 349-362. doi: 10.1016/j.corsci.2018.05.030.
- Lyon SB, Bingham R, Mills DJ. Advances in corrosion protection by organic coatings: what we know and what we would like to know. *Prog Org Coat*. 2017; 102: 2-7. doi: 10.1016/j.porgcoat.2016.04.030.
- Zin' IM, Mardarevych RS, Bilyi LM, Kornii SA, Duryagina ZA. Influence of the surface chemical treatment of D16T alloy on the protective properties of alkyd coatings. *Mater Sci*. 2019; 55: 284-290. doi: 10.1007/s11003-019-00301-3.
- Kendig M. Evaluation of corrosion inhibiting pigments. *ECS Trans*. 2010; 24(1): 39-49. doi: 10.1149/1.3453605.
- Qian Y, Li Y, Jungwirth S, Seely N, Fang Y, Shi X. The application of anti-corrosion coating for preserving the value of equipment asset in chloride-laden environments: a review. *Int J Electrochem Sci*. 2015; 10: 10756-10780.
- Hajkova T, Kalendova A. The anticorrosion properties of pigments based on molybdates and tungstates surface-modified with conducting polymers. *Koroze a Ochrana Materialu*. 2017; 61(1): 7-18. doi: 10.1515/kom-2017-0001.
- Tsai ST, ChangJean WC, Chao PH, Fu SY, Tsai TC. Whole pH range anti-corrosion property of aluminium alloy coated with MFI zeolite film. *Corros Eng Sci Technol*. 2018; 53: 34-38. doi: 10.1080/1478422X.2017.1420536.
- Shao Y, Jia C, Meng G, Zhang T, Wang F. The role of a zinc phosphate pigment in the corrosion of scratched epoxy-coated steel. *Corros Sci*. 2009; 51: 371-379. doi: 10.1016/j.corsci.2008.11.015.
- Alibakhshi E, Ghasemi E, Mahdavian M. Sodium zinc phosphate as a corrosion inhibitive pigment. *Prog Org Coat*. 2014; 77: 1155-1162. doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.03.027.
- Pokhmurskii VI, Zin IM, Bily LM, Vynar VA, Zin YI. Aluminium alloy corrosion inhibition by chromate-free composition of zinc phosphate and ion-exchanged zeolite. *Surf Interface Anal*. 2013; 45: 1474-1478. doi: 10.1002/sia.5275.
- 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.
- Queiroz FM, Magnani M, Costa I, de Melo HG. Investigation of the corrosion behaviour of AA 2024-T3 in low concentrated chloride media. *Corros Sci*. 2008; 50: 2646-2657. doi: 10.1016/j.corsci.2008.06.041.
- Palomino LE, Castro JF, Aoki IV, De Melo HG. Microstructural and electrochemical characterization of environmentally friendly conversion layers on aluminium alloys. *J Braz Chem Soc*. 2003; 14(4): 651-659. doi: 10.1590/S0103-50532003000400024.
- Mansfeld F, Lin S, Kim S, Shih H. Pitting and passivation of Al alloys and Al-based metal matrix composites. *J Electrochem Soc*. 1990; 137: 78-82. doi: 10.1149/1.2086442.