

ІНГІБИТОРИ КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЮ В ЛУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Алюміній та його сплави знайшли широке застосування у якості конструкційних матеріалів, носіїв для активних систем та як анодний матеріал для метал-повітряних елементів. У попередньому дослідженні встановлено, що ефективними інгібіторами корозії алюмінію в лужному середовищі є аліфатичні та ароматичні карбонові кислоти, і зокрема нафталінтетракарбонова кислота. У представленій роботі досліджено вплив на корозійну поведінку алюмінію в 1М NaOH неорганічних добавок – $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, Na_2SiO_3 , SnSO_4 . Визначено, що $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ та багатокомпонентний інгібітор 0,01М $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01М SnSO_4 + 0,1М Na_2SiO_3 можуть бути використані для корозійного захисту алюмінію при його застосуванні у якості конструкційного матеріалу у слаболужних та лужних середовищах. Для зниження швидкості самоочинної корозії Al аноду в алюміній-повітряних елементах слід рекомендувати двокомпонентну інгібіторну композицію 0,01М $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01М SnSO_4 . Ця композиція при помірному гальмуванні анодного процесу забезпечує розчинення алюмінію з постійною швидкістю і збільшення катодної поляризації.

Ключові слова: алюміній, лужне середовище, інгібітори корозії, поляризаційні криві, струм корозії.

YE. M. ZAVERACH, O. I. STREMETSKYI
Khmelnitskyi National University

CORROSION INHIBITORS FOR ALUMINIUM IN ALKALINE MEDIUM

Aluminium has excellent mechanical and physicochemical properties that make it the ideal material for a wide range of applications, especially as a construction material and as an anode material for power sources. The use of inhibitors is one of the best options of protecting aluminium and its alloys against corrosion. In our previous work the polarization measurements and the quantum-chemical calculations have been allowed to estimate the ability of aliphatic and aromatic carboxylic acids to inhibit the aluminium corrosion in alkaline solution. It has been established that naphthalenetetracarboxylic acid is most effective inhibitor. The inhibition efficiency of naphthalenetetracarboxylic acid has become weaker with decreasing of its concentration. The aim of the present research is to investigate influence of inorganic inhibitors and inhibition compositions which include organic and inorganic substances on corrosion characteristics of aluminium in alkaline medium. It was found that only $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ shows great influence on aluminium corrosion in 1M NaOH. Inhibition effect of Na_2SiO_3 and SnSO_4 was enhanced by the addition of 0,01M naphthalenetetracarboxylic acid. It was found that corrosion current of aluminium in 1M NaOH without additives was 3,162 mA/cm², introducing 0,1M $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ – 0,038 mA/cm², introducing inhibition composition 0,01M $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01M SnSO_4 + 0,1M Na_2SiO_3 – 0,063 mA/cm². So these inhibitors can be recommended for corrosion protection of aluminium in weakly alkaline and alkaline solutions. Composition 0,01M $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01M SnSO_4 can be used as inhibitor of aluminium self-corrosion for metal-air batteries. This composition can provide anodic dissolution of aluminum with stable rate and increasing of cathodic polarization.

Key words: aluminium, alkaline medium, corrosion inhibitors, polarization curves, corrosion current.

Вступ

Алюміній та його сплави мають цілий ряд відмінних фізико-механічних та технологічних властивостей: висока корозійна стійкість, теплопровідність, електрична провідність, жароміцність, міцність і пластичність при низьких температурах, проста процедура нанесення захисних і декоративних покриттів, легкість реалізації обробки різанням і зварюванням [1–3]. Це й обумовлює широке застосування алюмінію та його сплавів у якості конструкційних матеріалів та носіїв для активних систем різноманітного призначення. Достатньо негативний стандартний потенціал (-1,66 В) та висока гравіметрична й об'ємна ємність (відповідно 2,89 А·год/г та 8,04 А·год/см³) дозволяє розглядати алюміній як перспективний анодний матеріал для метал-повітряних елементів [4, 5]. Тому дослідження систем алюміній-водний (неводний) розчин лугу або солі має велике практичне значення. При застосуванні цих систем у процесах обробки поверхні металу чи у хімічних джерелах струму слід забезпечити такі умови, щоб алюміній не пасивувався, але при цьому його корозія повинна бути мінімальною.

У попередньому дослідженні було встановлено, що ефективними інгібіторами корозії алюмінію в лужному середовищі є багатоосновні аліфатичні та ароматичні карбонові кислоти [6]. Найбільше зростання катодної поляризації спостерігалось при введенні у 1М NaOH бурштинової, лимонної, нафталінтетракарбонової кислот, при цьому також гальмувався і анодний процес. Слід наголосити на тому, що нафталінтетракарбонова кислота $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ проявляла інгібіторні властивості навіть при низьких концентраціях (0,01 моль/л). Щоб підсилити вплив $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ на катодний процес при помірному гальмуванні анодного розчинення алюмінію слід застосувати додаткові добавки, зокрема неорганічні. Про більш високий інгібуючий ефект суміші двох добавок – органічної та неорганічної, в порівнянні з ефектом дії будь-якої з них окремо зазначається у роботах [7, 9]. Так, у [7] встановлено, що помітне інгібування процесу корозії алюмінію у лужному середовищі досягається при введенні іонів Ca^{2+} та 2,3-дигідроксибутандіонової (винної) кислоти. На основі літературних даних [4, 8 – 11] для дослідження були вибрані наступні неорганічні добавки: тетраамоній пентавольфрамат $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, натрій силікат Na_2SiO_3 , станум сульфат SnSO_4 .

Таким чином мета представленої роботи полягала у визначенні впливу неорганічних добавок на корозійну поведінку алюмінію у лужному середовищі, а також створенні багатокомпонентної інгібіторної

композиції, яка б знижувала самочинну корозію алюмінію, не призводячи до його пасивації.

Експериментальна частина

У дослідженнях використовували алюмінієву фольгу марки А99 товщиною 100 мкм, яка проходила попередню термічну обробку при 300 °С протягом 1 год. з наступним поступовим охолодженням. З фольги виготовляли робочі електроди у вигляді прапорців площею 2 см² зі струмовідводом шириною 2 мм та довжиною 25 мм. Поляризаційні виміри проводили у 1 М NaOH без та при наявності інгібіторних добавок: 0,01 М SnSO₄; 0,01 та 0,1 М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O; 0,1 М Na₂SiO₃. Деякі експерименти відбувались при введенні у розчин двокомпонентної 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ та трьохкомпонентної інгібіторної добавки 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ + 0,1М Na₂SiO₃. Безпосередньо перед поляризаційними вимірами електроди з алюмінію піддавали активації у 10% розчині NaOH при кімнатній температурі протягом 60 с.

Поляризаційні виміри виконували у трьохелектродній скляній комірці, яка містила алюмінієвий робочий та допоміжний платиновий електроди, а також хлорсрібний електрод порівняння. Значення стаціонарного потенціалу робочого електроду фіксували через 5 – 10 хв. після його занурення у досліджуваний розчин. Поляризаційні криві знімали при швидкості розгортки потенціалу 1 мВ/с з застосуванням потенціостату ПИ-50-1.1 в компоновці з програматором ПР-8 та двокоординатним реєстратором ПДА-1-01. Потенціали електродів представлені у стандартній водневій шкалі. При аналізі поляризаційних кривих встановлювали значення стаціонарного потенціалу корозії, E_{ст.}, та величини анодної, ΔE_{ан.}, і катодної, ΔE_{кат.}, поляризації при густині струму 5 мА/см². Корозійні показники – потенціал корозії E_{кор.} та струм корозії j_{кор.} знаходили при проведенні дотичних до тафелівських прямолінійних ланок залежностей потенціалу від логарифму густини струму, побудованих на основі даних поляризаційних вимірів.

Поляризаційні криві, одержані на алюмінієвих електродах у 1 М NaOH без (криві 1 та 1') та при наявності неорганічних інгібіторів (криві 2 – 5 та 2' – 5') представлені на рис. 1. Ефективність інгібіторів можна попередньо оцінити при порівнянні значень E_{ст.}, ΔE_{ан.} та ΔE_{кат.} у 1 М NaOH з тими, що спостерігались у цьому ж розчині при введенні інгібіторів (таблиця 1). У таблиці 1 також представлені E_{ст.}, ΔE_{ан.} та ΔE_{кат.} для лужного розчину з додаванням 0,01 та 0,1 М C₁₄H₈O₈.

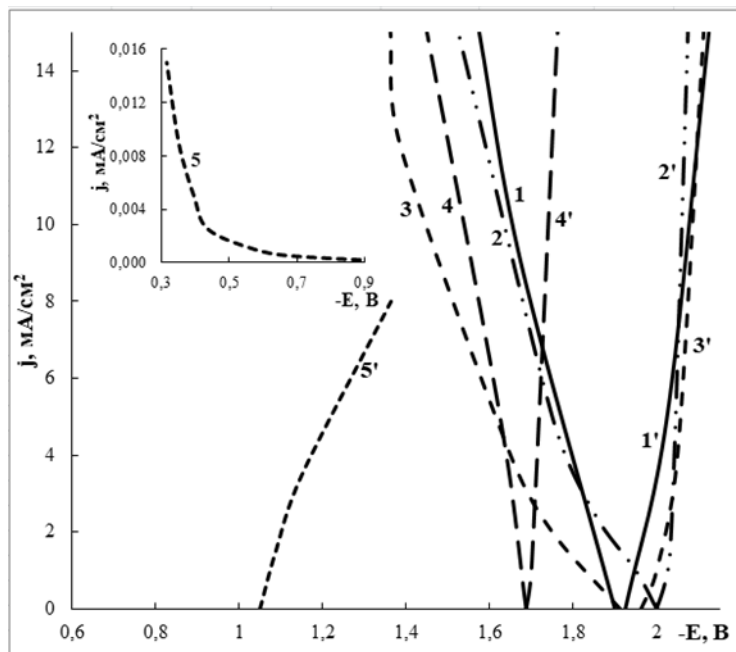


Рис. 1. Поляризаційні криві на електродах з алюмінію у 1 М розчині NaOH без (1, 1') та за наявності інгібіторів: 2, 2' – 0,01М SnSO₄; 3, 3' – 0,1М Na₂SiO₃; 4, 4' – 0,01 М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O; 5, 5' – 0,1 М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O

Таблиця 1

Значення E_{ст.}, ΔE_{ан.} та ΔE_{кат.} на електродах з алюмінію у досліджуваних розчинах

Розчин	E _{ст.} , В	ΔE _{ан.} , мВ	ΔE _{кат.} , мВ
1М NaOH	-1,940	140	-100
1М NaOH + 0,01 М SnSO ₄	-2,000	250	-50
1М NaOH + 0,1 М (NH ₄) ₄ W ₅ O ₁₇ ·2,5H ₂ O	-1,060	712,5	-162,5
1М NaOH + 0,01 М (NH ₄) ₄ W ₅ O ₁₇ ·2,5H ₂ O	-1,690	62,5	-22,5
1М NaOH + 0,1 М Na ₂ SiO ₃	-1,935	312,5	-125
1М NaOH + 0,1 М C ₁₄ H ₈ O ₈	-1,525	620	-425
1М NaOH + 0,01 М C ₁₄ H ₈ O ₈	-1,838	217,5	-210

Як неорганічні інгібітори, так і карбонові кислоти [6] призводили до більш суттєвого зростання

анодної поляризації в порівнянні з катодною. Як бачимо, $C_{14}H_8O_8$ та $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ зміщували стаціонарний потенціал Al до більш додатних значень (таблиця 1). Наявність $0,1 M Na_2SiO_3$ майже не впливала на цей показник, а в присутності $0,01 M SnSO_4$ $E_{ст.}$ зсунувся до більш негативних значень.

Характер кривих 2 та 2' рис. 1 вказує на те, що добавка $SnSO_4$ суттєво не змінює загальної швидкості корозії алюмінію. Зростання анодної поляризації незначне в порівнянні з іншими інгібіторами, до того ж зменшується катодна поляризація. Певний інгібуючий ефект станом сульфату можна пов'язати з контактним виділенням Sn з утворенням окремих острівців на поверхні алюмінію, що не перешкоджає його розчиненню, але разом з тим може змінювати перенапругу виділення водню [9]. $SnSO_4$ не є корисним в якості індивідуального інгібітора, але не виключено, що його наявність покращить вплив інших добавок, в особливості тих, що сильно пригальмовують анодний процес, зокрема, $C_{14}H_8O_8$ (таблиця 1).

Добавка Na_2SiO_3 помітно впливає на анодний процес і незначно збільшує катодну поляризацію (криві 3 та 3' рис. 1; таблиця 1). Відомо, що введення силікатів відображається на перебігу як анодної, так і катодної реакції, що пов'язано з утворенням на поверхні алюмінію пасиваційних шарів з важкорозчинних речовин [8]. У [10] відмічається, що більш високий ступінь захисту алюмінієвого сплаву АД-31 у слаболужному розчині триетаноламіну досягається саме при використанні натрій силікату у комбінації з ортофосфатною кислотою. Тому для зменшення швидкості корозії алюмінію слід випробувати Na_2SiO_3 у сполученні з $C_{14}H_8O_8$ та $SnSO_4$.

Особливо сильне зміщення стаціонарного потенціалу до $-1,06 V$ спостерігалось у присутності в лужному середовищі $0,1M (NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$. Це може свідчити про хімічну природу зв'язку металу з інгібітором. Про те, що добавка $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ сильно зменшує загальну корозію алюмінію за рахунок окислення його активної поверхні, свідчать також дуже низькі анодні струми та висока поляризація анодного процесу (крива 5 рис. 1). Вольфрамат-іони також помітно впливають і на катодну поляризацію (крива 5' рис. 1). Таким чином, вольфрамат-іони подібно до хромат- та біхромат-іонів є інгібіторами змішаного типу. Ймовірно, що механізм дії вольфрамат-іонів обумовлений їх адсорбцією на поверхні металу. При цьому вольфрамат-іони є акцепторами електронів, а взаємодія з металом відбувається за рахунок атомів Оксигену [8]. Але не слід повністю виключати можливість утворення при наявності в $1M NaOH$ вольфрамат-іонів тонкої конверсійної плівки на поверхні алюмінію, яка пригальмовує його анодне розчинення. Подібні спостереження описані у роботі [12], в якій досліджувалось формування пасивуючих плівок у лужному середовищі в присутності вольфрамат- і титанат-іонів на поверхні цинку та його сплавів.

Оскільки значне гальмування анодного процесу є небажаним, то концентрацію добавки $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ було знижено до $0,01$ моль/л. З характеру кривих 4 та 4' рис. 1 очевидно, що при малій концентрації вольфраму відбувається зростання швидкості розчинення алюмінію. Особливо знижується катодна поляризація (таблиця 1), тобто в присутності малих концентрацій вольфраму відбувається зростання ефективності катодного процесу. Подібні явища спостерігались і при інгібуванні корозії сталі натрій вольфрамом ($C = 0,001 - 0,2$ моль/л) у середовищах $0,1 n. Na_2SO_4$ та 30 мг/л $NaCl + 70$ мг/л Na_2SO_4 [8].

Надалі при аналізі поляризаційних кривих (рисунок 2) були визначені потенціали та струми корозії як для самих ефективних індивідуальних інгібіторів, $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ та $C_{14}H_8O_8$, так і для багатокомпонентних добавок, що містили: $0,01 M C_{14}H_8O_8 + 0,01 M SnSO_4$; $0,01 M C_{14}H_8O_8 + 0,01 M SnSO_4 + 0,1 M Na_2SiO_3$. Отримані значення $E_{кор.}$ та $j_{кор.}$ представлені у таблиці 2.

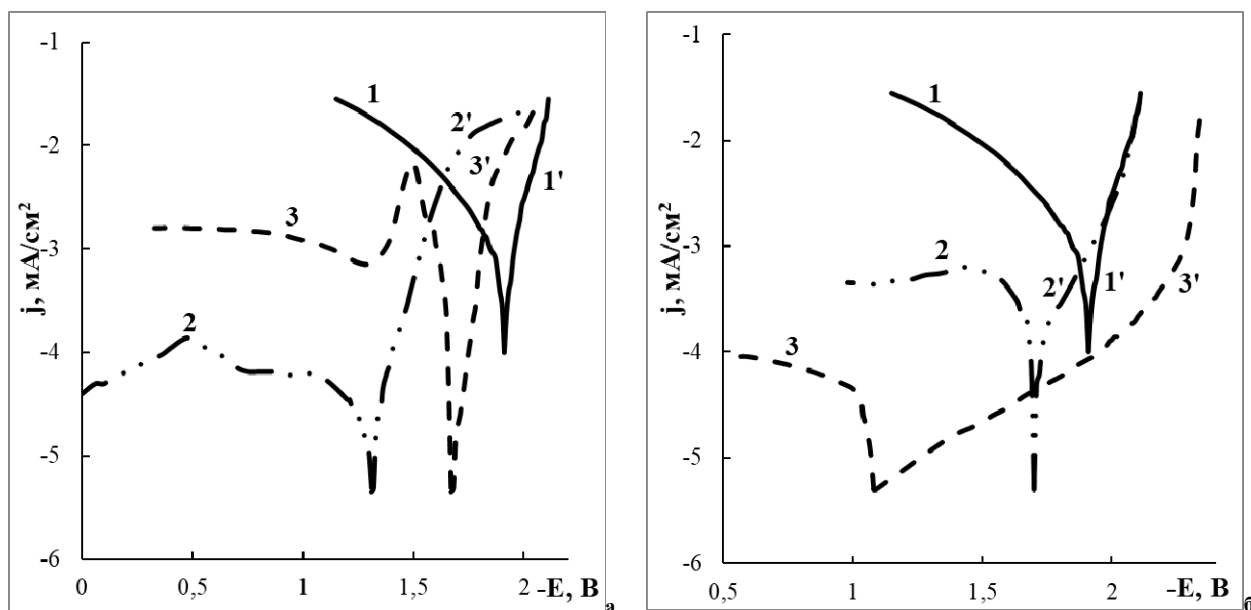


Рис. 2. Поляризаційні криві на електродах з алюмінію у $1 M$ розчині $NaOH$ без (1, 1') і при наявності однокомпонентних інгібіторних добавок (а): 2, 2' – $0,1 M (NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$; 3, 3' – $0,1M C_{14}H_8O_8$ та багатокомпонентних інгібіторних добавок (б): 2, 2' – $0,01M C_{14}H_8O_8 + 0,01M SnSO_4$; 3, 3' – $0,01M C_{14}H_8O_8 + 0,01M SnSO_4 + 0,1M Na_2SiO_3$

Як бачимо, всі досліджені індивідуальні та багатокомпонентні інгібіторні добавки забезпечують зсув $E_{кор.}$ у бік більш додатних значень та помітне зниження $j_{кор.}$ (таблиця 2). Поляризаційні криві показують, що при наявності інгібіторів зростає поляризація катодного процесу (криві 1' – 3' рис. 2а та 2б) та помітно знижуються значення анодних струмів (криві 2, 3 рис. 2а та 2б) у порівнянні з тими, що спостерігаються в 1М розчині NaOH (крива 1 рис. 2). До того ж введення добавок призводить до виходу анодного струму на граничне значення, що вказує на перебіг окиснення алюмінію зі стабільною у часі швидкістю.

Таблиця 2

Потенціали та струми корозії на електродах з алюмінію у досліджуваних розчинах

Розчин	$E_{кор.}$, В	$j_{кор.}$, mA/cm ²
1М NaOH	-1,98	3,162
1М NaOH + 0,1М (NH ₄) ₄ W ₅ O ₁₇ ·2,5H ₂ O	-1,32	0,038
1М NaOH + 0,1М C ₁₄ H ₈ O ₈	-1,78	0,240
1М NaOH + 0,01М C ₁₄ H ₈ O ₈ + 0,01М SnSO ₄	-1,88	0,316
1М NaOH + 0,01М C ₁₄ H ₈ O ₈ + 0,01М SnSO ₄ + 0,1М Na ₂ SiO ₃	-1,65	0,063

Дані таблиці 2 показують, що добавка тетраамоній пентавольфрамату суттєво зміщує потенціал корозії до більш додатних значень, а нафталінтетракарбонова кислота та багатокомпонентні інгібіторні добавки – у меншій мірі. Найбільш значне зниження струму корозії забезпечує багатокомпонентний інгібітор 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ + 0,1М Na₂SiO₃ – у 50 разів та 0,1М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O – у 83 рази, при цьому остання добавка суттєво гальмує анодний процес розчинення алюмінію (крива 2 рис. 2а). Ці інгібітори можна рекомендувати для корозійного захисту алюмінію при його використанні у якості конструкційного матеріалу у слаболужних та лужних середовищах.

Менш значне гальмування анодного процесу при суттєвому зниженні струму корозії спостерігалось у присутності інгібіторних добавок 0,1М C₁₄H₈O₈ та 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ (крива 3 рис. 2а та крива 2 рис. 2б; таблиця 2). При наявності у 1М NaOH 0,1М C₁₄H₈O₈ $j_{кор.}$ знизився у 13 разів, а композиції 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ – у 10 раз. Зазначимо, що використання двокомпонентної інгібіторної композиції також дозволяє збільшити поляризацію катодного процесу, до того ж вона містить органічну речовину у десятикратно меншій концентрації. Таким чином для зниження швидкості самочинної корозії Al аноду в алюміній-повітряних елементах слід застосовувати інгібіторну добавку 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄.

Висновки

Встановлено, що серед досліджених неорганічних речовин ефективним індивідуальним інгібітором корозії алюмінію може слугувати тільки тетраамоній пентавольфрамат (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O. В присутності цієї добавки у лужному середовищі потенціал корозії значно зміщується у позитивну сторону, а струм корозії знижується у 83 рази. SnSO₄ та Na₂SiO₃ не є корисними в якості індивідуальних інгібіторів, але їх наявність може покращити вплив інших добавок, зокрема нафталінтетракарбонової кислоти.

Визначено, що багатокомпонентний інгібітор 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ + 0,1М Na₂SiO₃ знижує струм корозії у 50 разів, а двокомпонентна інгібіторна композиція 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ – у 10 разів. Тому (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O та багатокомпонентний інгібітор можуть бути рекомендовані для корозійного захисту алюмінію при його використанні у якості конструкційного матеріалу у слаболужних та лужних середовищах. Двокомпонентна інгібіторна композиція, крім зниження струму корозії і забезпечення постійної швидкості анодного розчинення алюмінію, ще й дозволяє збільшити катодну поляризацію. Тому вона може бути використана для зниження швидкості самочинної корозії Al аноду в алюміній-повітряних елементах.

Література

1. Сильман Г. И. Материаловедение / Г. И. Сильман. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.
2. Штефан В. В. Коррозия алюминия за контакту з окисдованими титаном та цирконієм / В. В. Штефан, Б. І. Байрачний [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 5. – С. 107–113.
3. Богоявленська О. В. Удосконалення технології мікродугового окисдування сплавів алюмінію у лужних середовищах : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня к. т. н. 05.17.03 – технічна електрохімія / О. В. Богоявленська. – Харків, 2010. – 17 с.
4. Лукашук Т. С. Исследование влияния состава солевых электролитов на коррозионное и анодное поведение алюминия / Т. С. Лукашук, В. И. Ларин // Вісник Харківського національного університету. – 2008. – № 820. – Хімія, Вип. 16(39). – С. 328–331.
5. Mori R. Electrochemical properties of a rechargeable aluminium-air battery with a metal-organic framework as air cathode material / R. Mori // Royal Society of Chemistry Advances. – 2017. – № 7. – P. 6389 – 6395.
6. Заверач Є. М. Карбонові кислоти як інгібітори корозії алюмінію у лужних середовищах / Є. М. Заверач, О. І. Стремечкий, А. В. Свінтіцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – Т. 259, № 2. – С. 46–51.

7. Shao H. B. The cooperative effect of calcium ions and tartrate ions on the corrosion inhibition of pure aluminum in an alkaline solution / H. B. Shao, J. M. Wang, Z. Zhang et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2003. – V. 77, № 2. – P. 305–309.
8. Розенфельд И. Л. Ингибиторы коррозии / И. Л. Розенфельд. – М. : Химия, 1977. – 352 с.
9. Антропов Л. И. Ингибиторы коррозии металлов / Л. И. Антропов, Е. М. Макушин, В. Ф. Панасенко. – Киев : Техніка, 1981. – 183 с.
10. Самойленко С. О. Корозійна поведінка алюмінієвого сплаву АД-31 у розчинах триетаноламіну / С. О. Самойленко, В. Б. Байрачний [та ін.] // *Сучасні проблеми електрохімії : збірник наукових праць*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – С. 265–266.
11. Abd El Aal E.E. Factors affecting the corrosion behaviour of aluminium in acid solutions. II. Inorganic additives as corrosion inhibitors for Al in HCl solutions / E. E. Abd El Aal, S. Abd El Wanees et al. // *Corrosion Science*. – 2013. – V. 68. – P. 14–24.
12. Петренко Л. В. Анодні плівки на цинку і його сплавах, сформовані в лужних розчинах у присутності вольфрамат- і титанат-іонів / Л. В. Петренко, В. І. Коробов, К. О. Ребрик // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2011. – № 4(2). – С. 123–125.

References

1. Sil'man G. I. *Materialovedenie* / G. I. Sil'man. – М. : Izdatel'skij centr «Akademija», 2008. – 336 s.
2. Shtefan V. V. Koroziiia aliuminiuu za kontaktu z oksydovanymy tytanom ta tsyrkoniem / V. V. Shtefan, B. I. Bairachnyi [ta in.] // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. – 2015. – № 5. – S. 107–113.
3. Bohoiavlenska O. V. Udoshkalennia tekhnolohii mikroduhovoho oksyduvannia splaviv aliuminiuu u luzhnykh seredovyshchakh : avtoreferat dys. na zdobuttia nauk. stupenia k. t. n. 05.17.03 – tekhnichna elektrokhimiiia / O. V. Bohoiavlenska. – Kharkiv, 2010. – 17 s.
4. Lukashhuk T. S. Issledovanie vlijanija sostava solevykh jelektrolitov na korrozionnoe i anodnoe povedenie aljuminija / T. S. Lukashhuk, V. I. Larin // *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu*. – 2008. – № 820. – Himija, Vip. 16(39). – S. 328–331.
5. Mori R. Electrochemical properties of a rechargeable aluminium-air battery with a metal-organic framework as air cathode material / R. Mori // *Royal Society of Chemistry Advances*. – 2017. – № 7. – P. 6389 – 6395.
6. Zaverach Ye. M. Karbonovi kysloty yak inhibitory korozii aliuminiuu u luzhnykh seredovyshchakh / Ye. M. Zaverach, O. I. Stremetskyi, A. V. Svintitskyi // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – T. 259, № 2. – S. 46–51.
7. Shao H. B. The cooperative effect of calcium ions and tartrate ions on the corrosion inhibition of pure aluminum in an alkaline solution / H. B. Shao, J. M. Wang, Z. Zhang et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2003. – V. 77, № 2. – P. 305–309.
8. Rozenfel'd I. L. Ingibitory korrozii / I. L. Rozenfel'd. – М. : Himija, 1977. – 352 s.
9. Antropov L. I. Ingibitory korrozii metallov / L. I. Antropov, E. M. Makushin, V. F. Panasenko. – Киев : Tehnika, 1981. – 183 s.
10. Samoilenko S. O. Koroziiina povedinka aliuminiievoho splavu AD-31 u rozchynakh tryetanolaminu / S. O. Samoilenko, V. B. Bairachnyi [ta in.] // *Suchasni problemy elektrokhimii : zbirnyk naukovykh prats*. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – S. 265–266.
11. Abd El Aal E.E. Factors affecting the corrosion behaviour of aluminium in acid solutions. II. Inorganic additives as corrosion inhibitors for Al in HCl solutions / E. E. Abd El Aal, S. Abd El Wanees et al. // *Corrosion Science*. – 2013. – V. 68. – P. 14–24.
12. Petrenko L. V. Anodni plivky na tsynku i yoho splavakh, sformovani v luzhnykh rozchynakh u prysutnosti volframmat- i tytanat-ioniv / L. V. Petrenko, V. I. Korobov, K. O. Rebryk // *Voprosy khymyy y khymycheskoj tekhnolohyy*. – 2011. – № 4(2). – S. 123–125.

Рецензія/Peer review : 6.2.2019 р. Надрукована/Printed :10.4.2019 р.

Рецензент: к. х. н., доц. Байдич Л. Е.