



UDC 680.18:669.71

## COMPARATIVE STUDY ON CORROSION OF ICOSAHEDRAL AND DECAAGONAL QUASICRYSTALS OF Al-BASED ALLOYS IN ACIDS

Volodymyr A. Polonskyi<sup>1</sup>, Olena V. Sukhova<sup>1</sup>, Volodymyr A. Ivanov<sup>2</sup><sup>1</sup>Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine<sup>2</sup>Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Received 16 February 2022; accepted 24 June, Available online 25 July 2022

### Abstract

The corrosion properties of Al-Cu-Fe and Al-Cu-Co alloys that form quasicrystalline phases differing in crystallographic order, respectively three-dimensional icosahedral  $\psi$ -phase and two-dimensional decagonal D-phase, were investigated in this work. The structure of the alloys was studied by methods of quantitative metallographic, atomic absorption spectroscopic, X-ray diffraction, and scanning electron microscopic analyses. Corrosion was explored for 1–4 hours by gravimetric method in HNO<sub>3</sub>, HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aqueous acidic solutions (pH = 1.0) at room temperature. After 4 testing hours, the maximal specific mass loss of the Al-Cu-Fe alloys was established to occur in the sulphuric acid and minimal mass loss – in the orthophosphoric acid. For the Al-Cu-Co alloys, maximal specific mass loss was observed in the orthophosphoric acidic solution and minimal – in the nitric acidic solution. In all investigated acidic media, the Al-Cu-Co alloys forming decagonal quasicrystals showed higher resistance to corrosion than the Al-Cu-Fe alloys forming icosahedral quasicrystals. The results of corrosion tests were explained considering the surface morphology of the samples exposed to acidic attacks studied by scanning electron microscopy. The phases containing less iron in the structure of the Al-Cu-Fe alloys or phases containing more cobalt in the structure of the Al-Cu-Co alloys are less susceptible to corrosion.

**Keywords:** icosahedral and decagonal quasicrystals, aqueous acidic solutions, specific mass change, corrosion rate, phases susceptible to corrosion.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОРОЗІЇ В КИСЛОТАХ ІКОСАЕДРИЧНИХ І ДЕКАГОНАЛЬНИХ КВАЗІКРИСТАЛІВ У СПЛАВАХ НА ОСНОВІ АІ

Володимир А. Полонський<sup>1</sup>, Олена В. Сухова<sup>1</sup>, Володимир А. Іванов<sup>2</sup><sup>1</sup>Дніпровський національний університет імені Олесея Гончара, Дніпро, Україна<sup>2</sup>Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

### Анотація

У роботі досліджені корозійні властивості сплавів Al-Cu-Fe і Al-Cu-Co, які містять квазікристалічні фази з різним типом кристалографічного порядку, а саме: тривимірну ікосаедричну  $\psi$ -фазу та двовимірну декагональну D-фазу відповідно. Структуру сплавів вивчали методами кількісного металографічного, атомно-абсорбційного спектроскопічного, рентгеноструктурного та растрового електронно-мікроскопічного аналізів. Корозію досліджували протягом 1–4 годин гравіметричним методом у водних розчинах кислот HNO<sub>3</sub>, HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> і H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH = 1.0) за кімнатної температури. Встановлено, що після 4 годин випробувань максимальна питома втрата маси сплавів Al-Cu-Fe відбувається в сульфатній кислоті, а мінімальна – в ортофосфорній. Для сплавів Al-Cu-Co, максимальна питома втрата маси спостерігається в розчині ортофосфатної кислоти, а мінімальна – в розчині нітратної кислоти. В усіх досліджених кислотних середовищах сплави Al-Cu-Co, в яких утворюються декагональні квазікристали, характеризуються більшим опором до корозії, чим сплави Al-Cu-Fe, в структурі яких присутні ікосаедричні квазікристали. Отримані результати корозійних випробувань пояснені з урахуванням результатів дослідження поверхні зразків сплавів після перебування в розчинах кислот із застосуванням методу растрової електронної мікроскопії. Фази в структурі сплавів Al-Cu-Fe, що містять менше заліза, та фази в структурі сплавів Al-Cu-Co, що містять більше кобальту, менш схильні до корозії.

**Ключові слова:** ікосаедричні та декагональні квазікристали, водні розчини кислот, питома зміна маси, швидкість корозії, схильні до корозії фази.

\*Corresponding author: e-mail address: polva57@gmail.com

© 2022 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v30i2.253020

## Вступ

Опір до дії корозійних середовищ має особливе значення для практичного застосування багатьох матеріалів [1–6]. Зазвичай, корозійні властивості залежать від хімічного складу та мікроструктури сплавів [7–10]. Відкриття квазікристалів створює нові можливості для розробки корозійнотривких покриттів [11–14]. Квазікристали відносять до нового класу матеріалів, які мають аперіодичний кристалографічний порядок [15–17]. Завдяки особливій структурі, квазікристали володіють унікальними поверхневими властивостями, такими як висока мікротвердість, мала поверхнева енергія, низький коефіцієнт тертя, висока окислювальна стійкість тощо [18–24]. Недоліком квазікристалів вважають їх підвищену крихкість, що не дозволяє виготовляти з них вироби повністю. Однак, поєднання цінних фізичних та механічних властивостей робить квазікристали перспективними матеріалами для їх застосування у вигляді покриттів [25–30].

Квазікристалічні фази знайдені більш ніж у сотні металевих систем. До таких систем належать потрібні сплави Al-Cu-Fe та Al-Cu-Co, в яких ці фази кристалізуються в умовах повільного охолодження. В системі Al-Cu-Fe утворюється ікосаедрична фаза ( $\psi$ -фаза), для якої характерний аперіодичний порядок у трьох напрямках [31–33]. В системі Al-Cu-Co спостерігається декагональна фаза (D-фаза), яка має аперіодичний порядок у двох напрямках і періодичний порядок у третьому напрямку [34; 35].

Відомо, що корозійна тривкість квазікристалічних сплавів Al-Cu-Fe в розчинах кислот є доволі високою завдяки утворенню тонкого пасивного шару на поверхні [36]. Дослідження поверхні сплавів після корозії вказують на її рівномірне розчинення в кислотах з подальшим повторним осадженням розчиненої міді [37]. Вибіркову корозію Al і Fe в поєднанні з об'ємною дифузією Cu також розглядають як можливий механізм корозії. Дослідження корозії сплавів Al-Cu-Fe в розчинах сульфатної кислоти різної концентрації (pH = 3 і pH = 5) свідчать про те, що на корозійну поведінку цих квазікристалічних сплавів впливає не квазікристалічність, а склад фаз, присутніх у структурі [38]. Фази з низьким вмістом міді більш схильні до корозії, тоді як фази з високим вмістом міді

практично не кородують завдяки більш позитивному електродному потенціалу Cu порівняно з потенціалами Al чи Fe. Корозія переважно виникає поблизу міжфазних границь і проходить за електрохімічним механізмом.

Відомості про вплив кислих середовищ на корозійні властивості квазікристалічних сплавів Al-Cu-Co в літературі не знайдені, незважаючи на перспективність їх використання для отримання корозійнотривких покриттів [39; 40].

Властивості декагональних квазікристалів значною мірою відрізняються від властивостей ікосаедричних квазікристалів. А відтак, їх корозійні властивості також можуть бути суттєво різними. З огляду на цінність цих матеріалів для практичного застосування, в роботі проведені порівняльні дослідження корозійної поведінки ікосаедричних і декагональних квазікристалічних фаз у сплавах Al-Cu-Fe і Al-Cu-Co в розчинах кислот  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  і  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (pH = 1.0).

## Матеріали та методика експерименту

Квазікристалічні сплави на основі Al виплавляли в наступних концентраційних діапазонах (в ат. %): сплави Al-Cu-Fe – Al (63–65), Cu (24–25), Fe (11–12); сплави Al-Cu-Co – Al (63–65), Co (20–21), Cu (15–16) (чистота не менше 99.9 %). Швидкість охолодження сплавів дорівнювала 5 °C/с. Середній хімічний склад сплавів визначали методом атомно-абсорбційного спектроскопічного аналізу на приладі Sprut СЕФ-01-М. Мікроструктуру сплавів вивчали за допомогою оптичного мікроскопу Neophot. Кількісні металографічні вимірювання проводили на структурному аналізаторі Eriquant. Для ідентифікації фаз у порошкових зразках застосовували рентгеноструктурний аналіз у Cu-K $\alpha$  випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-УМ-1.

Корозійні властивості визначали гравіметричним методом після витримки досліджуваних зразків сплавів упродовж 1–4 годин у розчинах хлоридної, сульфатної, нітратної та ортофосфорної кислот (pH = 1.0). Корозійні випробування проводили за температури  $20 \pm 2$  °C. Значення показника pH корозійного середовища вимірювали за допомогою іономіра ЕВ-74. Після занурення у розчини кислот зразки зважували на аналітичних вагах WA-21 з похибкою, меншою за 0.1 мг. Швидкість корозії розраховували, послуговуючись формулою,

наведеною в [41]. Поверхню сплавів, яка зазнала дії кислих розчинів, досліджували на растровому електронному мікроскопі PEM-106И (SEM).

### Результати експерименту та їх обговорення

За даними металографічного та рентгеноструктурного аналізів у структурі досліджених квазікристалічних сплавів Al-Cu-Fe утворюються первинні дендрити фази  $\lambda$ -Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, навколо яких спостерігаються обідки ікосаедричної  $\psi$ -фази, що кристалізується за перитектичною реакцією  $P+\lambda\rightarrow\psi$  [42]. Відносний вміст квазікристалів у структурі становить ~50-55 об. %. По границях  $\psi$ -фази присутні кристалічні фази  $\beta$ -Al(Cu,Fe) та  $\theta$ -(Al<sub>2</sub>Cu).

У структурі сплавів Al-Cu-Co ідентифіковані три фази [43; 44]. Квазікристалічна декагональна D-фаза кристалізується у вигляді стовпчастих дендритів за перитектичною реакцією між первинною фазою Al<sub>4</sub>(Co,Cu)<sub>3</sub> та рідиною. Об'ємний вміст квазікристалів становить ~60-65 об. %. Залишок рідини твердіє з утворенням фази Al<sub>3</sub>(Cu,Co)<sub>2</sub>.

Під час корозійних випробувань сплавів Al-Cu-Fe і Al-Cu-Co у досліджених кислих середовищах зовнішній вигляд зразків змінюється, що проявляється як потемніння поверхні або поява на ній кольорів мінливості. Цей результат можна пояснити утворенням на поверхні сплавів захисного шару з продуктів корозії внаслідок їх розчинення на початковому етапі. З появою цього шару пов'язана зміна кольору зразків після занурення. Крім того, під дією водних розчинів кислот на поверхні зразків виділяється газ, причому найбільш активно це відбувається в розчині хлоридної кислоти для сплавів Al-Cu-Fe або в розчині ортофосфатної кислоти для сплавів Al-Cu-Co. Такий ефект зазвичай викликаний інтенсивним розчиненням компонентів сплавів, які вивільнюються у вигляді газоподібних продуктів реакції.

Гравіметричні дослідження свідчать про те, що в розчині нітратної кислоти сплави Al-Cu-Fe кородують значно швидше, ніж сплави Al-Cu-Co (рис. 1, а). Маса зразків Al-Cu-Fe поступово зменшується, а зразків Al-Cu-Co – незначно збільшується. Причому для сплавів Al-Cu-Fe найбільша питома втрата маси спостерігається після 1-ої години випробувань, а для сплавів Al-Cu-Co

найбільший питомий приріст маси відбувається після 3-ої години.

В розчині хлоридної кислоти маса зразків сплавів Al-Cu-Fe протягом перших двох годин витримки збільшується, а потім починає зменшуватися, тоді як маса зразків Al-Cu-Co весь час поступово збільшується (рис. 1, б). Питома зміна маси сплавів Al-Cu-Fe має найбільше значення після 1-ої години витримки, а сплавів Al-Cu-Co – після 2-ої години. Описані зміни маси зразків пов'язані з різним співвідношенням швидкостей розчинення і накопичення на поверхні зразків продуктів корозії.

У розчині сульфатної кислоти досліджені сплави кородують сильніше, а їх маса поступово зменшується (рис. 1, с). Причому питома втрата маси зразків Al-Cu-Co на порядок менша за втрату маси зразків Al-Cu-Fe. Найбільше питома зменшення маси сплавів Al-Cu-Fe відбувається після 3-ої години випробувань, а сплавів Al-Cu-Co – після 1-ої години.

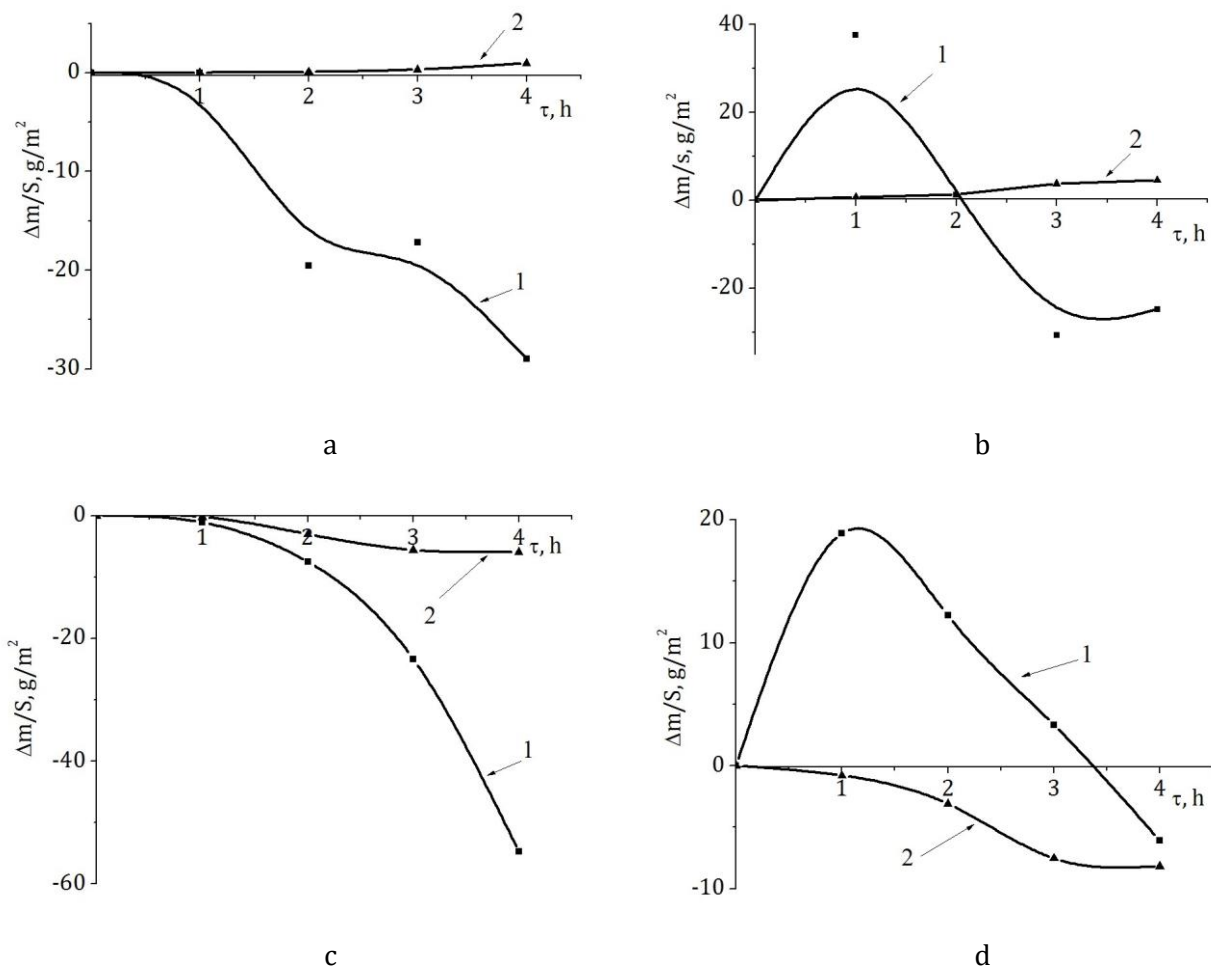
Під дією ортофосфатної кислоти маса сплавів Al-Cu-Co лише зменшується, а сплавів Al-Cu-Fe протягом 3-х годин збільшується, а потім стає меншою, що пов'язане з розчиненням як продуктів корозії, так і компонентів сплавів (рис. 1, d). Для сплавів Al-Cu-Fe найбільший питомий приріст маси відбувається протягом 1-ої години випробувань, а для сплавів Al-Cu-Co найбільша питома втрата маси спостерігається після 2-ої години.

В порядку зростання питомої зміни маси сплавів Al-Cu-Fe після корозії упродовж 4 годин, розчини кислот можна розташувати в такому порядку:

ортофосфатна → хлоридна → нітратна → сульфатна.

Для сплавів Al-Cu-Co цей ряд виглядає так: нітратна → хлоридна → сульфатна → ортофосфатна.

Порівняння результатів гравіметричних вимірювань показує, що сплави Al-Cu-Co, в яких утворюється декагональна квазікристалічна D-фаза, характеризуються більшим опором до корозії в усіх досліджених розчинах. Кобальт, присутній у складі сплавів Al-Cu-Co, сповільнює корозію в кислих середовищах, в той час як залізо в сплавах Al-Cu-Fe її прискорює. Цей висновок підтверджують результати визначення швидкості корозії зразків, наведені в таблиці.



**Fig.1. Mass change per unit area vs. corrosion time for Al-Cu-Fe (curve 1) and Al-Cu-Co (curve 2) alloys in the acidic solutions (pH = 1.0): a - HNO<sub>3</sub>; b - HCl; c - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; d - H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

**Рис.1. Залежності питомої зміни маси сплавів Al-Cu-Fe (крива 1) та Al-Cu-Co (крива 2) від тривалості витримки в розчинах кислот (pH = 1.0): a - HNO<sub>3</sub>; b - HCl; c - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; d - H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

**Corrosion rates of the investigated quasicrystalline alloys in acidic solutions (pH = 1.0)**

Table

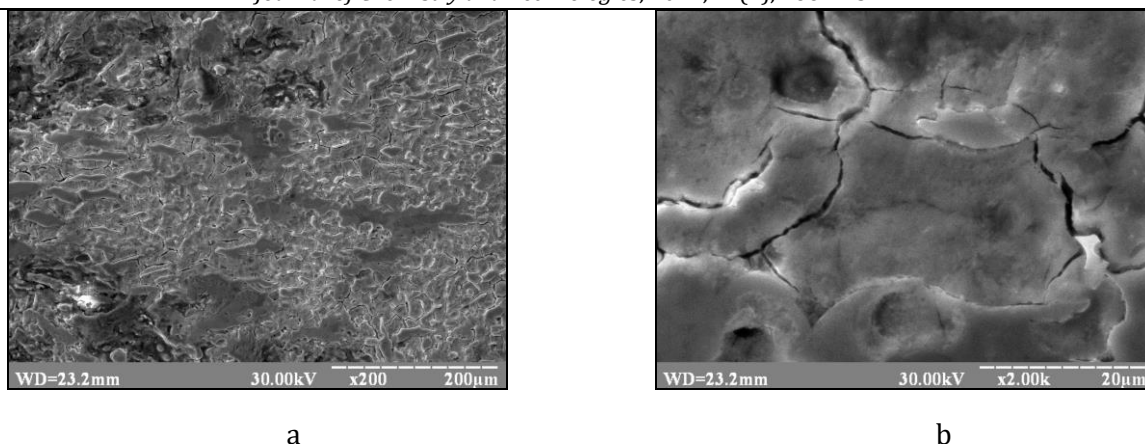
**Швидкість корозії досліджених квазікристалічних сплавів у розчинах кислот (pH = 1.0)**

Таблиця

Alloys	Corrosion rate, g/m <sup>2</sup> ·h			
	HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Al-Cu-Fe	6.19±0.14	4.10±0.11	9.55±0.25	2.53±0.07
Al-Cu-Co	1.15±0.01	0.24±0.02	1.47±0.02	2.05±0.03

Досліджені корозійні середовища викликають аналогічні руйнування поверхні сплавів, найбільш характерно виражені для зразків, які були витримані у розчині сульфатної кислоти. Так, за даними растрової електронної мікроскопії, на поверхні зразків сплавів Al-Cu-Fe після перебування в розчині найбільш агресивної сульфатної кислоти спостерігаються ділянки нерівномірного розвитку кислотної корозії (рис. 2, a).

Кристалічна фаза  $\lambda$ -Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> кородує сильніше через схильність фаз, що мають підвищений вміст заліза, до корозії [38; 42]. Це означає, що присутність заліза в сплавах Al-Cu-Fe знижує опір до дії сульфатної кислоти. Квазікристалічна  $\psi$ -фаза з меншим вмістом заліза кородує слабкіше порівняно з  $\lambda$ -фазою. Крім того, корозія локалізується вздовж більш дефектних міжфазних границь  $\psi$ - $\lambda$  та  $\psi$ -( $\beta$ , $\theta$ ) (рис. 2, b).

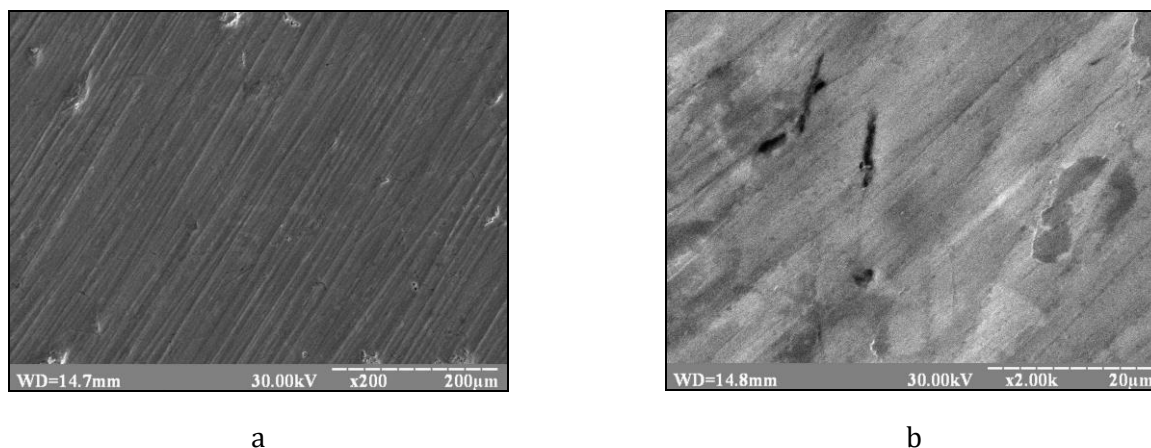


**Fig.2. SEM-images of surface of the Al-Cu-Fe alloy after 4 holding hours in sulphuric acidic solution (pH = 1.0): a - x200; b - x2000**

**Рис.2. СЕМ-фотографії поверхні зразка сплаву Al-Cu-Fe після 4 годин витримки в розчині сульфатної кислоти (pH = 1.0): a - x200; b - x2000**

Після 4 годин перебування зразків сплавів Al-Cu-Co у розчині сульфатної кислоти на їх поверхні не виявлені ділянки сильного кислотного руйнування (рис. 3). Поверхня сплавів відносно рівномірно розчиняється в місцях розташування квазікристалічної D-фази та кристалічної фази  $Al_4(Co,Cu)_3$ . Тоді як кристалічна фаза  $Al_3(Cu,Co)_2$  розчиняється з дещо більшою швидкістю. Ця фаза має найменший вміст кобальту, а також

кристалізується з рідини останньою, що може призвести до утворення більш дефектної структури фази [44]. Отже, кобальт позитивно впливає на корозійну тривкість фазових складових сплавів Al-Cu-Co у разі локального чи рівномірного руйнування пасивного оксидного шару, який формується на їх поверхні під час перебування в сульфатній кислоті.



**Fig.3. SEM-images of surface of the Al-Cu-Co alloy after 4 holding hours in sulphuric acidic solution (pH = 1.0): a - x200; b - x2000**

**Рис.3. СЕМ-фотографії поверхні зразка сплаву Al-Cu-Co після 4 годин витримки в розчині сульфатної кислоти (pH = 1.0): a - x200; b - x2000**

Таким чином, результати растрової електронної мікроскопії підтверджують, що сплави Al-Cu-Fe більш активно кородують у розчині сульфатної кислоти порівняно зі сплавами Al-Cu-Co. Дію кислоти гальмує Co, присутній у складі структурних складових цих сплавів. Кислота діє лише локально, що забезпечує менші втрати маси та нижчу швидкість корозії. Отже кобальт сприяє

підвищенню корозійної тривкості сплавів на основі алюмінію в досліджених кислих середовищах.

### Висновки

Корозійні випробування сплавів Al-Cu-Fe, в структурі яких утворюється квазікристалічна ікосаедрична  $\psi$ -фаза, показали, що після першої години досліджень

у розчинах нітратної та сульфатної кислот маса зразків практично не змінюється, а у розчинах хлоридної та ортофосфорної кислот збільшується через накопичення на поверхні продуктів корозії. Після 4 годин випробувань маса зразків сплавів Al–Cu–Fe змінюється максимально в розчині сульфатної кислоти, а мінімально – в розчині ортофосфатної кислоти. Під дією кислот поверхня сплавів розчиняється нерівномірно. Переважно у структурі кородують багата на залізо фаза  $\lambda$ -Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> та міжфазні границі поділу.

Сплави Al–Cu–Co, в яких спостерігається квазікристалічна декагональна D-фаза, кородують з меншою швидкістю в усіх розчинах кислот порівняно зі сплавами Al–Cu–Fe. Маса зразків у розчинах хлоридної та нітратної кислот поступово зростає, особливо в розчині хлоридної кислоти. Після перебування у розчинах сульфатної та ортофосфатної кислот маса зразків навпаки зменшується, більшою мірою в розчині ортофосфатної кислоти. Поверхня сплавів Al–

Cu–Co відносно рівномірно розчиняється під дією кислот за виключенням ділянок розташування границь поділу кристалічної фази Al<sub>3</sub>(Cu,Co)<sub>2</sub>, які розчиняються з більшою швидкістю. Порівняно зі сплавами Al–Cu–Fe, корозія поверхні сплавів Al–Cu–Co проходить більш рівномірно.

В досліджених кислих середовищах (pH = 1.0) найбільш інтенсивно кородують фази з більшим вмістом заліза в структурі сплавів Al–Cu–Fe або з меншим вмістом кобальту в структурі сплавів Al–Cu–Co. Тому декагональна квазікристалічна фаза сплавів Al–Cu–Co, яка містить кобальт, характеризується меншою схильністю до корозії, ніж ікосаедрична квазікристалічна фаза сплавів Al–Cu–Fe, яка містить залізо. Враховуючи більш інертну поведінку сплавів Al–Cu–Co в кислих середовищах порівняно зі сплавами Al–Cu–Fe, ці сплави можна рекомендувати для отримання корозійнотривких захисних покриттів.

## Reference

- [1] Ostash, O. P., Kulyk, V. V., Lenkovskiy, T. M., Duriagina, Z. A., Vira, V. V., Tepla, T. L. (2018). Relationships Between the Fatigue Crack Growth Resistance Characteristics of a Steel and the Tread Surface Damage of Railway Wheel. *Arch. Mater. Sci. Eng.*, 90(2), 49–55. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.0662>
- [2] Sukhova, O. V. (2020) The Effect of Carbon Content and Cooling Rate on the Structure of Boron-Rich Fe–B–C Alloys. *Phys. Chem. Solid St.*, 21(2), 355–360. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.2.355-360>.
- [3] Spiridonova, I. M., Sukhovaya, E. V., Butenko, V. F., Zhudra, A. P., Litvinenko, A. I., Belyi, A. I. (1993) Structure and Properties of Boron-Bearing Iron Granules for Composites. *Powder Metall. Met. Ceram.*, 32(2), 139–141. <https://doi.org/10.1007/BF00560039>.
- [4] Duryagina, Z. A., Bespalov, S. A., Borysyuk, A. K., Pidkova, V. Ya. (2011) Magnetometric analysis of surface layers of 12X18H10T steel after ion beam nitriding. *Metallofiz. Noveishie Technol.*, 33(5), 615–622.
- [5] Vashchenko, A. P., Spiridonova, I. M., Sukhovaya, E. V. (2000) Deformation and Fracture of Structural Materials Under High-Rate Strain. *Metallurgia*, 39(2), 89–92.
- [6] Tkachenko, R., Duriagina, Z., Lemishka, Z., Izonin, I., Trostianchyn A. (2018) Development of Machine Learning Method of Titanium Alloy Properties Identification in Additive Technologies. *East-Eur. J. Enterp. Technol.*, 3(12), 23–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.134319>.
- [7] Chabak, Y. G., Fedun, V. I., Shimizu, K., Efremenko, V. G., Zurnadzhy, V. I. (2016) Phase-Structural Composition of Coating Obtained by Pulsed Plasma Treatment Using Eroded Cathode of T1 High Speed Steel. *Probl. At. Sci. Technol.*, 104(4), 100–106.
- [8] Zurnadzhy, V. I., Efremenko, V. G., Petryshynets, I., Shimizu, K., Brykov, M. N., Kushchenko, I. V., Kudin, V. V. (2020) Mechanical Properties of Carbide-Free Lower Bainite in Complex-Alloyed Constructional Steel: Effect of Bainitizing Treatment Parameters. *Kovove Materialy*, 58, 129–140. [https://doi.org/10.4149/km\\_2020\\_2\\_129](https://doi.org/10.4149/km_2020_2_129).
- [9] Trembach, B., Grin, A., Subbotina, V., Vynar, V., Knyazev, S., Vakiev, V., Trembach, I., Kabatskyi, O. (2021) Effect of Exothermic Addition (CuO–Al) on the Structure, Mechanical Properties and Abrasive Wear Resistance of the Deposited Metal During Self-Shielded Flux-Cored Arc Welding. *Tribol. Ind.*, 43(3), 452–464. <https://doi.org/10.24874/ti.1104.05.21.07>.
- [10] Sukhova, O. V., Syrovatko, Yu. V. (2011) Features of Structurization of Composite Materials of the Solution-and-Diffusion Type. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 33(Special Issue), 371–378.
- [11] Zhong, J. B., Chen, Y. J., Teng, L. L., Shao, X. J., Han, B., Yan, F. (2021) Research Progress on Al-based Quasicrystal Films/coatings. *China Surf. Eng.*, 34(5), 105–116. <https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20210530002>.
- [12] Zakharova, I., Royanov, V., Chigarev, V. (2021) Airflow Dynamics and Aluminum Coating Oxidation Behavior under Electric-Arc Spraying with Airflow Pulsations. *Appl. Sci.*, 11(18), 8444. <https://doi.org/10.3390/app11188444>.
- [13] Młynarek-Żak, K., Wierzbicka-Miernik, A., Kądziołka-Gaweł, M., Czeppe, T., Radoń, A., Babilas, R. (2022) Electrochemical Characterization of Rapidly Solidified Al–(Cr,Cu,Ni,Y,Zr)–Fe Alloys. *Electrochim. Acta*, 1, 139836. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.139836>.
- [14] Babilas, R., Bajorek, A., Spilka, M., Radon, A., Lonski, W. (2020) Structure and Corrosion Resistance of Al–Cu–Fe Alloys. *Prog. Nat. Sci.*, 30(3), 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.06.002>.
- [15] Parsamehr, H., Lu, Y.-J., Lin, T.-Y., Tsai, A.-P., Lai, C.-H. (2019) In-Situ Observation of Local Atomic Structure

- of Al-Cu-Fe Quasicrystal Formation. *Sci. Rep.*, 9, 1245-1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37644-x>.
- [16] Zou, Y., Wheeler, J. M., Sologubenko, A. S., Michler, J., Streurer, W., Spolenak, R. (2016) Bridging Room-Temperature and High-Temperature Plasticity in Decagonal Al-Ni-Co Quasicrystal by Microthermomechanical Testing. *Phil. Mag.*, 96(32-34), 3356-3378. <https://doi.org/10.1080/14786435.2016.1234722>.
- [17] Luca, B., Pham, J., Steinhardt, P. J. (2018) Previously Unknown Quasicrystal Periodic Approximant Found in Space. *Sci. Rep.*, 8, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34375-x>.
- [18] Stadnik, Z. M. (1999). *Physical Properties of Quasicrystals*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58434-3>.
- [19] Trebin, H. R. (2003) *Quasicrystals: Structure and Physical Properties*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. <https://doi.org/10.1002/3527606572>.
- [20] Dubois, J.-M. (2012) Properties and Applications of Quasicrystals and Complex Metallic Alloys. *Chem. Soc. Rev.*, 41, 4760-6777. <https://doi.org/10.1039/C2CS35110B>.
- [21] Huttunen-Saarivirta, E. (2004) Microstructure, Fabrication and Properties of Quasicrystalline Al-Cu-Fe Alloys: A Review. *J. Alloys Compd.*, 363(1-2), 150-174. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00445-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00445-6).
- [22] Sukhova, O. V. Polonskyy, V. A. Ustinova, K. V. (2019) Corrosion-Electrochemical Properties of Quasicrystalline Al-Cu-Fe-(Si,B) and Al-Ni-Fe Alloys in NaCl Solution. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 124(3), 46-52. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2018-121-6-77-83>
- [23] Sukhova, O. V., Polonskyy, V. A., Ustinova, K. V. (2017) Structure Formation and Corrosion Behaviour of Quasicrystalline Al-Ni-Fe Alloys. *Phys. Chem. Solid St.*, 18(2), 222-227. <https://doi.org/10.15330/PCSS.18.2.222-227>.
- [24] Rampulla, D. M., Mancinelli, C. M., Brunell, I. F., Gellman, A. J. (2005) Oxidative and Tribological Properties of Amorphous and Quasicrystalline Approximant Al-Cu-Fe Thin Films. *Langmuir*, 6, 4547-4553. <https://doi.org/10.1021/la0469093>.
- [25] Wolf, W., Bolfarini, C., Kiminami, C. S., Botta, W. J. (2021) Recent Developments on Fabrication of Al-Matrix Composites Reinforced with Quasicrystals: From Metastable to Conventional Processing. *J. Mater. Res.*, 36, 281-297. <https://doi.org/10.1557/s43578-020-00083-4>.
- [26] Sukhovaya, E. V. (2013) Structural Approach to the Development of Wear-Resistant Composite Materials. *J. Superhard Mater.* 35(5), 277-283. <https://doi.org/10.3103/S106345761305002X>.
- [27] Jithesh, K., Prabhu, T. R., Anant, R. V., Arivarasu, M., Srinivasan, A., Mishra, R. K., Arivazhagan, N. (2019) An Overview of Quasicrystal Reinforced Magnesium Metal Matrix Composites. *Mater. Sci. Forum.*, 969, 218-224. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.969.218>.
- [28] Kamalnath, M., Mohan, B., Singh, A., Thirumavalavan, K. (2020) Development of Al1070 Quasicrystal (Al<sub>65</sub>Cu<sub>23</sub>Fe<sub>12</sub>) Composites Using Friction Stir Processing and Its Mechanical Characterization. *Mater. Res. Express*, 7(2), 1-11. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab71c5>
- [29] Yadav, T. P., Singh, D., Tiwari, R. S., Srivastava, O. N. (2012) Enhanced Microhardness of Mechanically Activated Carbon-Quasicrystal Composite. *J. Mater. Lett.*, 80, 5-8. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2012.04.034>.
- [30] Krawczyk, J., Gurdziel, W., Bogdanowicz, W., Flisinski, K. (2010) Temperature Influence on Stress-Strain Relationship of Al-Cu-Fe Crystal-Quasicrystal Composites. *Solid State Phenom.*, 163, 282-285. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.163.282>.
- [31] Rosas, G., Reyes-Gasga, J., Pérez, R. (2007) Morphological Characteristics of the Rapidly and Conventionally Solidified Alloys of the AlCuFe System. *Mater. Charact.*, 58(8-9), 765-770. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.12.004>.
- [32] Duneau, M., Audier, M. (2009) Structural Characteristics of Pentagonal Al-Cu-Fe phases. *Phil. Mag.*, 77(3), 675-688. <https://doi.org/10.1080/01418619808224076>.
- [33] Guedes de Lima, B. A., Gomes, R. G., Guedes de Lima, S. J., Drago, D., Barthes-Labrousse, M. G., Kouitat-Njiwa, R., Dubois, J. M. (2016) Self-Lubricating, Low-Friction Wear-Resistant Al-Based Quasicrystalline Coatings. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 17(1), 71-79. <https://doi.org/10.1080/14686996.2016.1152563>.
- [34] Bogdanowicz, W., Krawczyk, J. (2010) X-ray Topography Study of Deformed Composites Obtained by Directional Solidification of Al-Cu-Co alloy. *Cryst. Res. Technol.*, 45(12), 1321-1325. <https://doi.org/10.1002/crat.201000313>.
- [35] Holland-Moritz, D., Jacobs, G., Egry, I. (2000) Investigations of the Short-Range Order in Melts of Quasicrystal-Forming Al-Cu-Co alloys by EXAFS. *Mater. Sci. Eng.*, A294-296, 369-372. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01126-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01126-6).
- [36] Kang, Y., Zhou, C., Gong, S., Xu, H. (2005) Corrosion of Al-Cu-Fe-Cr Quasicrystalline Coating. *Mater. Sci. Forum.*, 475-479, 3355-3358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.475-479.3355>.
- [37] Rudiger, A., Koster, U. (2000) Corrosion Behavior of Al-Cu-Fe Quasicrystals. *Mater. Sci. Eng.*, A294-296, 890-893. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01037-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01037-6).
- [38] Huttunen-Saarivirta, E., Tiainen, T. (2004) Corrosion Behaviour of Al-Cu-Fe Alloys Containing a Quasicrystalline Phase. *Mater. Chem. Phys.*, 85(2-3), 383-395. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2004.01.025>.
- [39] Sukhova, O. V., Polonskyy, V. A., Ustinova, K. V. (2018). Microstructure and Corrosion Properties of Quasicrystal Al-Cu-Fe Alloys Alloyed with Si and B in Acidic Solutions. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 121(6), 77-83. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2018-121-6-77-83>.
- [40] Ryabtsev, S. I., Polonskyy, V. A., Sukhova, O. V. (2020) Structure and Corrosion of Quasicrystalline Cast Alloys and Al-Cu-Fe Film Coatings. *Mater. Sci.*, 56(2), 263-272 <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00428-8>
- [41] Zharskyy, I. M., Ivanova, N. P., Kuis, D. V., Svidunovich, N. A. (2012) *Corrosion and Protection of Metal Constructions and Equipment*. Minsk: Vysh. shk.
- [42] Sukhova, O. V., Polonskyy, V. A. (2020) Structure and Corrosion of Quasicrystalline Cast Al-Co-Ni and Al-Fe-Ni Alloys in Aqueous NaCl Solution. *East Eur. J. Phys.*, 3,

- 
- 5-10. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-3-01>
- [43] Sukhova, O. V., Syrovatko, Yu. V. (2019) New Metallic Materials and Synthetic Metals. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41(9), 1171-1185. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.09.1171>
- [44] Sukhova, O. V., Polonsky, V. A. (2021) Peculiarities in the Structure Formation and Corrosion of Quasicrystalline Al<sub>65</sub>Co<sub>20</sub>Cu<sub>15</sub> Alloy in Neutral and Acidic Media. *East Eur. J. Phys.*, 3, 49-54. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2021-3-07>.