



UDC 680.18:669.71:669.18

STRUCTURE AND CORROSION PROPERTIES OF QUASICRYSTALLINE Al-Ni-Co AND Al-Ni-Fe ALLOYS IN AQUEOUS ACIDIC SOLUTIONS

Vladimir A. Polonsky, Olena V. Sukhova

Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarin Ave., Dnipro 49010, Dnipro, Ukraine

Received 7 June 2021; accepted 12 October 2021; available online 27 October 2021

Abstract

The structure and corrosion properties of as-cast quasicrystalline $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ and $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ alloys in acidic media were studied in this work. The structure was investigated by the methods of quantitative metallography, X-ray analysis, scanning electron microscopy, and energy-dispersive X-ray spectrometry. Corrosion resistance was evaluated by gravimetric method in aqueous acidic solutions of HCl, H_2SO_4 , HNO_3 , and H_3PO_4 (pH=1.0). Both the investigated alloys were shown to form stable decagonal quasicrystalline D-phases. In the $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ alloy, the D-phase is a primarily solidified phase but, in the $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ alloy, the D-phase is formed peritectically. Depending on the alloy composition, two types of decagonal quasicrystals were observed that belong in $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ and $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ alloys, respectively, to $Al_{86}Fe_{14}$ - and $Al_{73}Co_{27}$ -based compounds alloyed with Ni. The $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ alloy exhibits the highest resistance to corrosion in the nitric acidic solution, but the $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ alloy – in chloric, orthophosphoric, and sulphuric acidic solutions (in descending order). For both alloys, in the most solutions, relatively uniform dissolution of the alloys' surface is observed except for the more defective areas that dissolve at a higher rate.

Kew words: as-cast quasicrystalline alloys; decagonal quasicrystals; structure; acidic media; corrosion resistance.

СТРУКТУРА ТА КОРОЗИЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КВАЗИКРИСТАЛІЧНИХ СПЛАВІВ Al-Ni-Co ТА Al-Ni-Fe У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ КИСЛОТ

Володимир А. Полонський, Олена В. Сухова

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна

Анотація

У роботі вивчали структуру та корозійні властивості литих квазікристалічних сплавів $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ та $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ у кислих середовищах. Структуру зразків досліджували методами кількісної металографії, рентгеноструктурного аналізу, растрової електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу. Корозійну тривкість вивчали гравіметричним методом у водних розчинах кислот HCl, H_2SO_4 , HNO_3 та H_3PO_4 (pH=1.0). Показано, що в обох досліджених сплавах утворюються стабільні декагональні квазікристалічні D-фази. У сплаві $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ D-фаза кристалізується з розплаву першою, а в сплаві $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ D-фаза виділяється за перитектичною реакцією. Залежно від складу сплавів спостерігаються два типи декагональних квазікристалів, які утворюються на основі легованих Ni хімічних сполук $Al_{86}Fe_{14}$ в сплаві $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ і $Al_{73}Co_{27}$ в сплаві $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$. Найбільшу корозійну тривкість у розчині нітратної кислоти має сплав $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$, а у розчинах хлоридної, ортофосфатної та сульфатної кислот (у порядку зменшення) – сплав $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$. У більшості розчинів відбувається відносно рівномірне розчинення поверхні зразків за виключенням ділянок з більш дефектною структурою, які розчиняються з більшою швидкістю.

Ключові слова: квазікристалічні сплави; декагональні квазікристали; структура; кислі середовища; корозійна тривкість.

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

© 2021 Oles Honchar Dnipro National University

doi: 10.15421/jchemtech.v29i3.233588

СТРУКТУРА И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Al-Ni-Co И Al-Ni-Fe В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ КИСЛОТ

Владимир А. Полонский, Елена В. Суховая

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, Днепр, 49010, Украина

Аннотация

В работе изучали структуру и коррозионные свойства литых квазикристаллических сплавов $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ и $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ в кислых средах. Структуру образцов исследовали методами количественной металлографии, рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Коррозионную стойкость изучали гравиметрическим методом в водных растворах кислот HCl , H_2SO_4 , HNO_3 и H_3PO_4 ($pH=1.0$). Показано, что в обоих исследованных сплавах образуются стабильные декагональные квазикристаллические D-фазы. В сплаве $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ D-фаза кристаллизуется из расплава первой, а в сплаве $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ D-фаза выделяется в ходе перитектической реакции. В зависимости от состава сплавов наблюдаются два типа декагональных квазикристаллов, которые образуются на основе легированных Ni химических соединений $Al_{86}Fe_{14}$ в сплаве $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ и $Al_{73}Co_{27}$ в сплаве $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$. Наибольшую коррозионную стойкость в растворе азотной кислоты имеет сплав $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$, а в растворах соляной, ортофосфатной и серной кислот (в порядке убывания) – сплав $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$. В большинстве растворов происходит относительно равномерное растворение поверхности образцов за исключением участков с более дефектной структурой, которые растворяются с большей скоростью.

Ключевые слова: квазикристаллические сплавы; декагональные квазикристаллы; структура; кислые среды; коррозионная стойкость.

Введение

Квазикристаллические сплавы на основе алюминия считаются одними из наиболее перспективных современных материалов, применение которых позволяет создавать изделия с уникальным сочетанием свойств [1–3]. Благодаря образованию в их структуре квазикристаллических фаз достигаются высокие антикоррозионные и антифрикционные свойства, стойкость в окислительной, абразивной и газоабразивной средах [4–9]. Однако, имея высокую твердость, квазикристаллы характеризуются повышенной хрупкостью, что значительно снижает их эксплуатационный ресурс [3; 4]. Поэтому на практике квазикристаллические сплавы используют в качестве наполнителей композиционных материалов, наносят в виде покрытий методами электрохимического осаждения, ионноплазменного напыления, осаждения из газовой фазы и др. [10–19].

Использование квазикристаллических сплавов-наполнителей в составе композиционных материалов позволяет избежать хрупкого разрушения квазикристаллов благодаря наличию пластичной металлической матрицы. Развитие трещин останавливается на границах раздела между наполнителем и матрицей, не приводя к разрушению материала [20–22]. Для создания композиционных материалов особый интерес представляют сплавы Al-Ni-Co [23–26] и Al-Ni-Fe [27–29], в структуре которых декагональная квазикристаллическая фаза (D-фаза) образуется при обычных скоростях

охлаждения. Эта фаза относится к двумерным квазикристаллам, для которых характерен периодический порядок в расположении атомов вдоль оси симметрии 10-го порядка и аперриодический порядок в плоскости, перпендикулярной этой оси [30–33]. Важным преимуществом декагональных квазикристаллов является их стабильность вплоть до температуры 1300 К, что позволяет выполнять пропитку композиционных материалов металлическими сплавами-связками на основе меди и алюминия [34; 35].

Одним из требований к композиционным материалам, используемым для защиты поверхности деталей авиационной и ракетно-космической техники, является их высокая коррозионная стойкость в кислых средах. Однако в литературе найдены лишь ограниченные сведения о поведении квазикристаллических сплавов Al-Ni-Co и Al-Ni-Fe в растворах кислот [36; 37].

Поэтому в работе исследовали структуру и коррозионную стойкость квазикристаллических сплавов $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ и $Al_{69}Co_{21}Ni_{10}$ с целью разработки состава сплава-наполнителя композиционных материалов, предназначенных для работы в кислых средах.

Материалы и методика эксперимента

Сплавы $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ и $Al_{69}Co_{21}Ni_{10}$ получали сплавлением химически чистых компонентов (99.99 %) в графитовых тиглях в печи Таммана. Содержание химических элементов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на

установке СЕФ-01-М «Спрут». Скорость охлаждения сплавов составляла 5 К/с. Микроструктуру сплавов изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot» (ОМ) и структурного анализатора «Epiquant». Идентификацию фаз проводили методом рентгеноструктурного анализа на аппарате ДРОН-УМ с использованием излучения Cu-K α . Исследования методом рентгеноспектрального микроанализа выполняли на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490LV (СЭМ), оборудованном энергодисперсионным спектрометром.

Коррозионные свойства сплавов исследовали при температуре 20 ± 2 °С гравиметрическим методом в течение 1–4 часов в водных растворах кислот HCl, H₂SO₄, HNO₃ и H₃PO₄. Для сравнения коррозионной стойкости использовали кислоты с одинаковым значением водородного показателя (pH = 1.0). Водородный показатель кислых сред контролировали с помощью иономера ЭВ-74. Образцы после

погружения в исследованные растворы взвешивали на аналитических весах WA-21 с точностью до 0.1 мг. Поверхность сплавов после пребывания в кислотах исследовали с помощью растрового электронного микроскопа РЕМ-06И.

Результаты эксперимента и их обсуждение

При затвердевании сплава Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ первой из жидкости выделяется фаза Al₅FeNi (рис. 1). Решетка этой фазы изоструктурна гексагональной решетке фазы Al₅Co₂ (hP28) [27–29]. Затем кристаллизуется квазикристаллическая декагональная D-фаза, имеющая согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа стехиометрический состав Al_{71.5}Fe₁₅Ni_{13.5}. Объемная доля этой фазы составляет около 24 % объема сплава (табл. 1). Учитывая принадлежность D-фазы к фазам Юм-Розери, расчет отношения количества валентных электронов (e) к количеству атомов (a) дает значение e/a=1.84 (табл. 1).

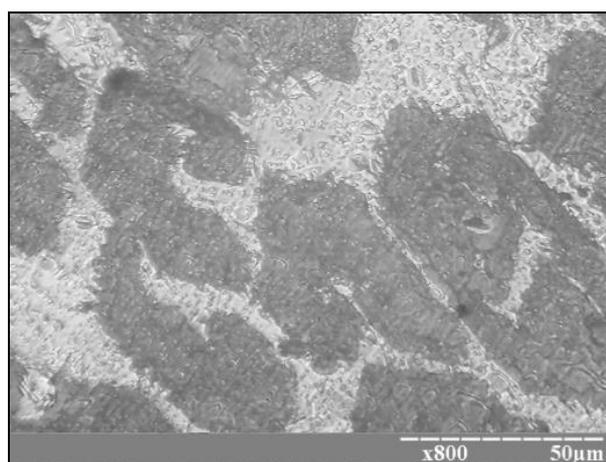
Table 1

The properties of quasicrystalline Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ and Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ alloys.

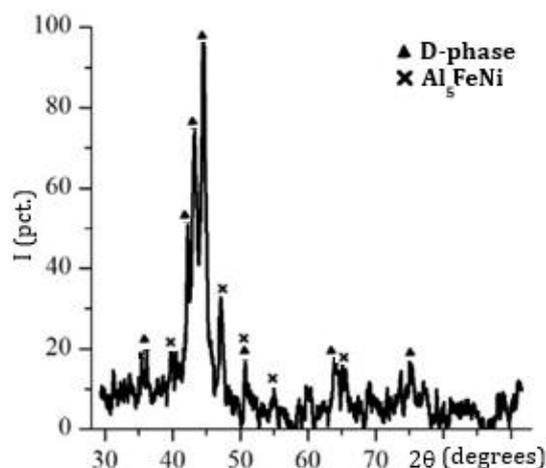
Таблица 1

Свойства квазикристаллических сплавов Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ и Al₇₂Co₁₈Ni₁₀.

Alloy	Phases	Volume fraction, %	Microhardness, GPa	e/a
Al ₇₂ Fe ₁₅ Ni ₁₃	D-фаза	23.8±0.1	8.6±1.0	1.84
	Al ₅ FeNi	76.2±0.1	4.8±0.4	1.86
Al ₇₂ Co ₁₈ Ni ₁₀	D-фаза	59.2±1.2	8.68±0.44	2.02
	Al ₉ (Co,Ni) ₂	40.8±0.5	4.17±0.35	1.99



a



b

Fig.1. As-cast quasicrystalline Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ alloy: a – OM-image; b – X-ray pattern

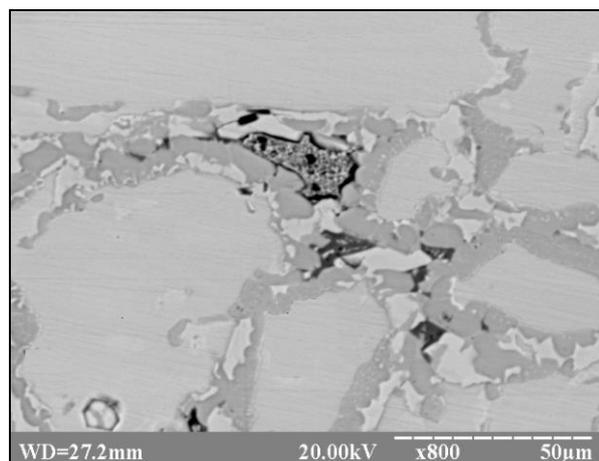
Рис.1. Литой квазикристаллический сплав Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃: a – ОМ-фото; b – рентгенограмма

Сплав Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ имеет двухфазную структуру (рис. 2). Около 60 % от его объема занимают кристаллы первичной D-фазы размерами 50–80 мкм. По данным рентгеноспектрального микроанализа эта

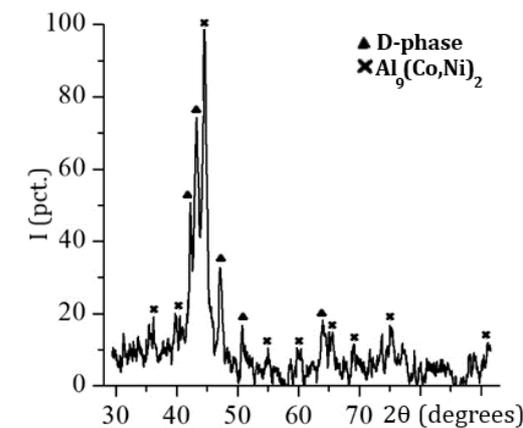
фаза имеет стехиометрический состав Al₆₉Co₂₁Ni₁₀. Кристаллы D-фазы окаймлены ободками кристаллической фазы Al₉(Co,Ni)₂. Она образуется по перитектической реакции Ж+D→Al₉(Co,Ni)₂ [23–26]. Ввиду различной

степени завершенности перитектической реакции состав фазы $\text{Al}_9(\text{Co,Ni})_2$ находится в пределах (по массе): 54.18–63.95 % Al; 11.22–

30.66 % Ni; 15.16–24.83 % Co. Отношение e/a для D-фазы в сплаве $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ увеличивается до значения e/a=2.02 (табл. 1).



a



b

Fig.2. As-cast quasicrystalline $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ alloy: a - SEM-image; b - X-ray pattern
Рис.2. Литой квазикристаллический сплав $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$: а - СЭМ-фото; б - рентгенограмма

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в исследованных сплавах наблюдаются два типа декагональных квазикристаллов. В сплаве $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ они образуются на основе соединения $\text{Al}_{73}\text{Co}_{27}$ и соответствуют типу D-AlCo, а в сплаве $\text{Al}_{72}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{13}$ – на основе соединения $\text{Al}_{86}\text{Fe}_{14}$ и принадлежат к типу D-AlFe. Декагональные D-квазикристаллы в сплавах $\text{Al}_{72}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{13}$ и $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ характеризуются повышенной микротвердостью, значительно превышающей эту характеристику для кристаллических фаз (табл. 1). Увеличение микротвердости сопровождается ростом хрупкости квазикристаллов.

Проведенные коррозионные испытания показали, что образцы обоих сплавов под действием кислот изменяют свой внешний вид. Это проявляется в виде потемнения поверхности и появления цветов побежалости. Указанные эффекты сильнее всего выражены для образцов, помещенных в растворы серной и особенно ортофосфатной кислот. В этих растворах происходит активное газовыделение, вызванное травлением компонентов сплавов. Такие же эффекты в намного меньшей степени наблюдаются в растворах азотной и соляной кислот.

Результаты гравиметрических измерений показали, что в растворах соляной и азотной

кислот для образцов сплава $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ наблюдается прирост массы, а сплава $\text{Al}_{72}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{13}$ – убыль массы (рис. 3а, 3б). Это означает, что для сплава $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ скорость селективного растворения компонентов меньше, чем скорость накопления продуктов коррозии на поверхности, а для сплава $\text{Al}_{72}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{13}$ – наоборот. Причем для сплава $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ наибольший прирост массы в растворе соляной кислоты наблюдается после 3-х часов испытаний, а в растворе азотной кислоты – после 1-го часа. Для сплава $\text{Al}_{72}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{13}$ потеря массы образцов после 3-х часов испытаний практически не изменяется. Этот сплав характеризуется большей коррозионной стойкостью в растворе азотной кислоты, тогда как сплав $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ – в растворе соляной кислоты.

В растворах серной и ортофосфорной кислот для образцов обоих сплавов характерна убыль массы (рис. 3с, 3д), что свидетельствует о преимущественном растворении компонентов сплавов в ходе испытаний. Наибольшая потеря массы образцов в этих кислотах наблюдается после 3-го часа испытаний, далее она стабилизируется. Сплав $\text{Al}_{72}\text{Co}_{18}\text{Ni}_{10}$ имеет более высокую коррозионную стойкость, особенно в растворе ортофосфорной кислоты, по сравнению со сплавом $\text{Al}_{72}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{13}$.

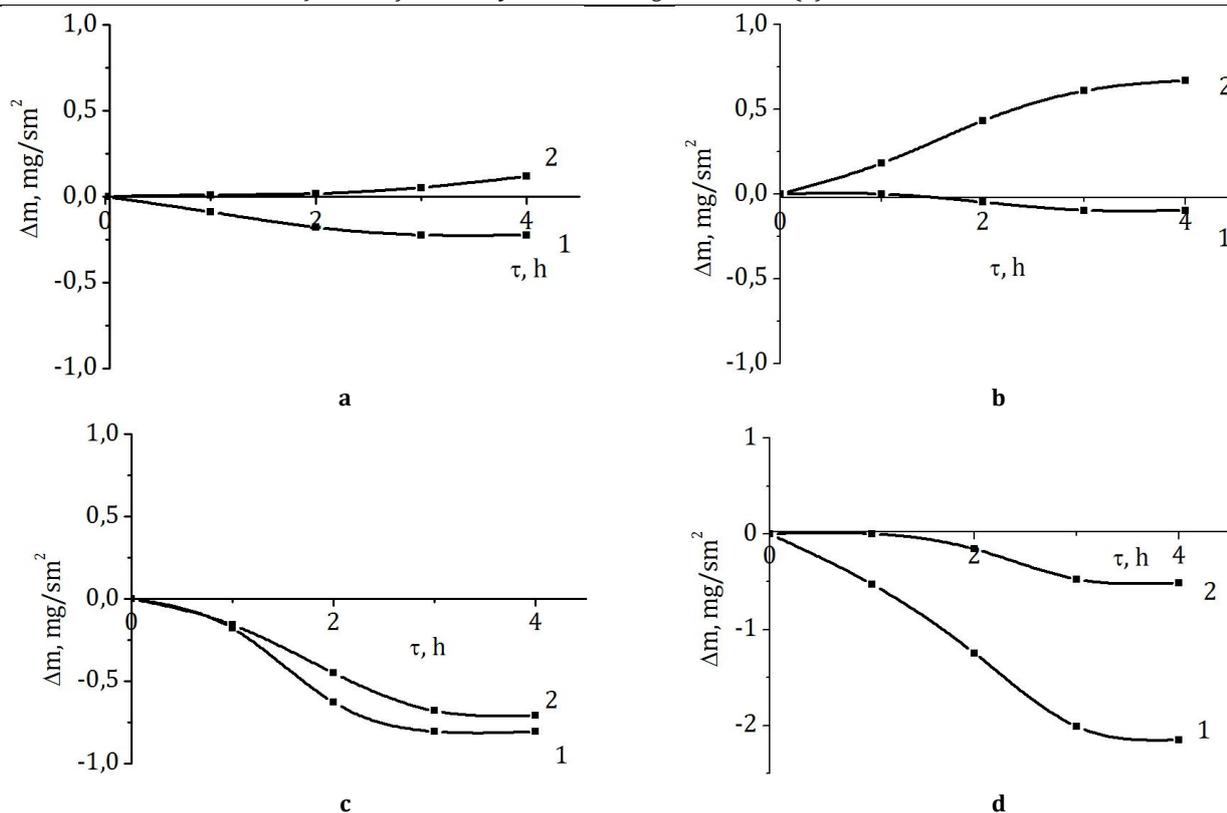


Fig.3. Mass change per unit area vs. corrosion time for the Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ (curve 1) and the Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ (curve 2) alloys in acidic solutions (pH=1.0): a - HCl; b - HNO₃; c - H₂SO₄; d - H₃PO₄

Рис.3. Зависимости изменения удельной массы образцов сплавов Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ (кривая 1) и Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ (кривая 2) от времени выдержки в растворах кислот (pH=1.0): a - HCl; b - HNO₃; c - H₂SO₄; d - H₃PO₄

В порядке возрастания удельного изменения массы образцов сплава Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ растворы кислот можно расположить в следующем порядке: HCl→H₃PO₄→HNO₃→H₂SO₄. Для образцов сплава Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ этот ряд выглядит таким образом: HNO₃→HCl→H₂SO₄→H₃PO₄. Сравнение результатов определения удельного изменения массы образцов, приведенных на рис. 3, указывает на то, что в большинстве исследованных кислых сред сплав Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ характеризуется более высоким сопротивлением коррозии.

Сделанные выводы подтверждают результаты исследований методом сканирующей электронной микроскопии поверхностей сплавов, прошедших коррозионные испытания в растворе серной кислоты. Установлено, что поверхность образцов сплава Al₇₂Fe₁₅Ni₁₃ относительно

равномерно растворяется в растворе этой кислоты (рис. 4). При увеличении изображения выявляются явные признаки химического травления преимущественно границ кристаллической фазы Al₅FeNi. Кроме того, встречаются участки питтинг-травления.

На поверхности образцов сплава Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ после 4 часов выдержки в растворе наиболее агрессивной серной кислоты отсутствуют явные признаки разрушения или растворения компонентов сплава (рис. 5). Коррозия протекает путем относительно равномерного травления поверхности. Причем преимущественно травятся межфазные границы раздела кристаллической фазы Al₉(Ni,Co)₂, которые, как известно, имеют более дефектную структуру.

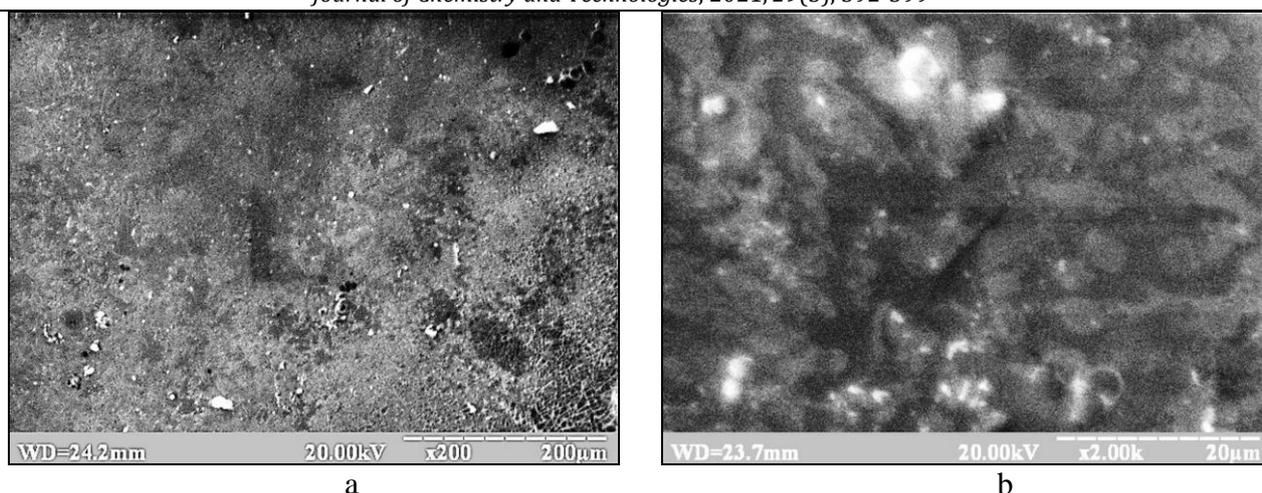


Fig.4. SEM-images of surface of the $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ alloy after 4 holding hours in sulphuric acidic solution (pH=1.0)
Рис.4. СЭМ-фото поверхности образца сплава $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ после 4 часов выдержки в растворе серной кислоты (pH=1.0)

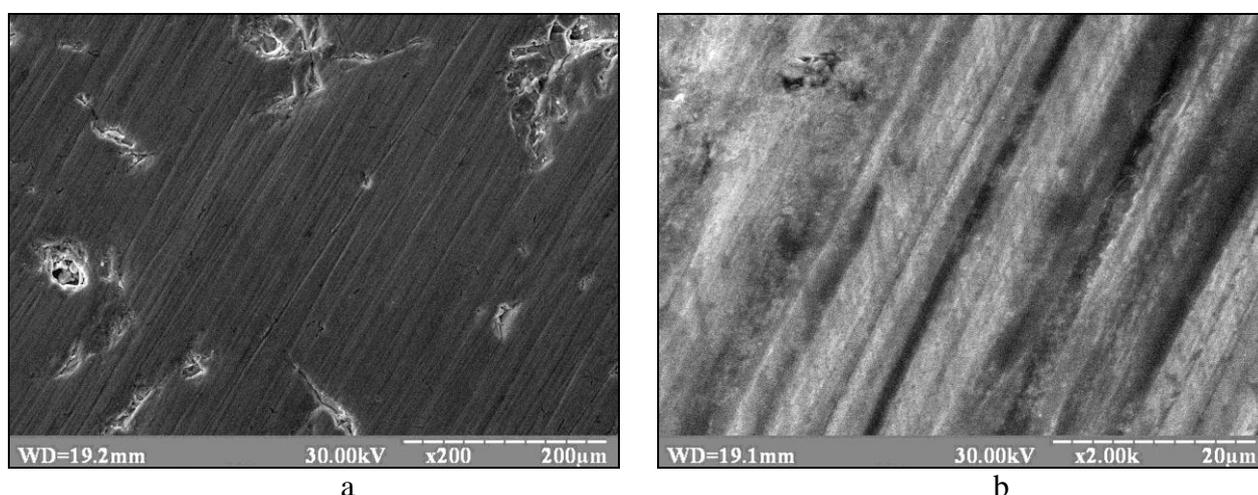


Fig.5. SEM-images of surface of the $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ alloy after 4 holding hours in sulphuric acidic solution (pH=1.0)
Рис.5. СЭМ-фото поверхности образца сплава $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ после 4 часов выдержки в растворе серной кислоты (pH=1.0)

Выводы

Исследованные квазикристаллические сплавы $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ и $Al_{69}Co_{21}Ni_{10}$ имеют двухфазную структуру, в которой наблюдаются квазикристаллы декагональной D-фазы и кристаллические фазы Al_5FeNi и $Al_9(Co,Ni)_2$ соответственно. D-фаза в сплаве $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ образуется на основе химического соединения $Al_{86}Fe_{14}$, а в сплаве $Al_{69}Co_{21}Ni_{10}$ – соединения $Al_{73}Co_{27}$. Микротвердость квазикристаллической фазы как в сплаве $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$, так и в сплаве $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$, в 1.8–2.1 раза превышает микротвердость кристаллических фаз.

В результате проведенных модельных коррозионных испытаний выявлено, что в растворах кислот коррозия сплавов проходит по типу травления, причем в первую очередь разрушаются границы раздела кристаллических фаз. В зависимости от

природы аниона кислоты коррозионная стойкость сплавов различается. Сплав $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ более устойчив в растворе азотной кислоты, а сплав $Al_{72}Fe_{15}Ni_{13}$ – в растворах соляной, серной и ортофосфатной кислот. Исследованные сплавы являются перспективными материалами для наполнителей коррозионностойких композиционных материалов, предназначенных для защиты поверхности деталей авиационной и ракетно-космической техники, подверженных влиянию кислых сред.

References

- [1] Stadnik, Z. M. (1999). *Physical Properties of Quasicrystals*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58434-3>.
- [2] Sukhova, O. V., Ustinova, K. V. (2019). The Effect of Cooling Rate on Phase Composition of Quasicrystalline Al-Cu-Fe Alloys Doped with Si and B. *Funct. Mater.*, 26(3), 495–506.

- <https://doi.org/10.15407/fm26.03.495>.
- [3] 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).
- [4] Trebin, H. R. (2003). *Quasicrystals: Structure and Physical Properties*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. <https://doi.org/10.1002/3527606572>.
- [5] Sukhova, O. V., Polonsky, 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>.
- [6] Sukhova, O. V., Polonsky, V. A., Ustinova, K. V. (2018). Influence of Si and B on Structure and Corrosion Properties of Quasi-Crystalline Al-Cu-Fe Alloys in Solutions of Salts. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 40(11), 1475-1487. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.11.1475>.
- [7] Sukhova, O. V., Polonsky, V. A., Ustinova, K. V. (2019). Corrosion Resistance of Alloys of the Al-Cu-Fe-(Si, B) System in Mineralized Saline and Acid Solutions. *Mater. Sci.*, 55(2), 285-292. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00302-2>.
- [8] 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*, 21(10), 4547-4553. <https://doi.org/10.1021/la0469093>.
- [9] Guedes de Lima, B. A., Gomes, R. G., Guedes de Lima, S. J., Dragoe, 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>.
- [10] 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>.
- [11] 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>.
- [12] 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.
- [13] Kamalnath, M., Mohan, B., Singh, A., Thirumavalavan, K. (2020). Development of Al1070 Quasicrystal (Al₆₅Cu₂₃Fe₁₂) Composites Using Friction Stir Processing and Its Mechanical Characterization. *Mater. Res. Express*, 7(2), 1-11. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab71c5>.
- [14] Ryabtsev, S. I., Polonsky, V. A., Sukhova, O. V. (2020). Effect of Scandium on the Structure and Corrosion Properties of Vapor-Deposited Nanostructured Quasicrystalline Al-Cu-Fe Films. *Powder Metall. Met. Ceram.*, 58(9-10), 567-575. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00111-2>.
- [15] Spyrdonova, I. M., Sukhova, O. V., Zinkovskij, G. V. (2012). Thin films and composites based on quasicrystal Al-Cu-Fe alloy. *Metallurgical and Mining Industry*, 4(4), 2-5.
- [16] Posuvailo, V. M., Kulyk, V. V., Duriagina, Z. A., Koval'chuck, I. V., Student, M. M., Vasylyv, B. D. (2020). The Effect of Electrolyte Composition on the Plasma Electrolyte Oxidation and Phase Composition of Oxide Ceramic Coatings Formed on 2024 Aluminium Alloy. *Arch. Mater. Sci. Eng.*, 105(2), 49-55. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5761>.
- [17] Kovbasiuk, T. M., Selivorstov, V. Yu., Dotsenko, Yu. V., Duriagina, Z. A., Kulyk, V. V., Kasai, O. M., Voitovych, V. V. (2020). The Effect of the Modification by Ultrafine Silicon Carbide Powder on the Structure and Properties of the Al-Si Alloy. *Arch. Mater. Sci. Eng.*, 101(2), 57-62. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1191>.
- [18] Vasylyv, B., Kulyk, V., Duriagina, Z., Mierzwinski, D., Kovbasiuk, T., Tepla, T. (2020). Estimation of the Effect of Redox Treatment on Microstructure and Tendency to Brittle Fracture of Anode Materials of YSZ-NiO(Ni) System. *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, 108(6), 67-77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218291>.
- [19] Mora, J., Garcia, P., Muelas, R., Agüero, A. (2020). Hard Quasicrystalline Coatings Deposited by HVOF Thermal Spray to Reduce Ice Accretion in Aero-Structures Components. *Coatings*, 10(3), 290-297. <https://doi.org/10.3390/coatings10030290>.
- [20] Spiridonova, I. M., Sukhova, O. V., Vashchenko, A. P. (1999). Multicomponent Diffusion Processes in Boride-Containing Composite Materials. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 21(2), 122-125.
- [21] 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>.
- [22] Spiridonova, I. M., Sukhovaya, E. V., Balakin, V. P. (1996). Structure and Deformation Peculiarities of Fe(B,C) Crystals. *Metallurgia*, 35(2), 65-68.
- [23] Zou, Y., Wheeler, J. M., Sologubenko, A. S., Michler, J., Streuer, 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>.
- [24] Jamshidi, L. C., Bodbari, R. J. (2018). Evolution of the Phases of Quasicrystalline Alloys Icosahedral/Decagonal Al_{62.2}Cu_{25.3}Fe_{12.5}/Al₆₅Ni₁₅Co₂₀ and Oxidative Behavior. *J. Chilean Chem. Soc.*, 63(2), 3928-3933. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072018000203928>.
- [25] Hiraga, K., Ohsuna, T., Sun, W., Sugiyama, K. (2002). The Structural Characteristics of Al-Co-Ni Decagonal Quasicrystals and Crystalline Approximants. *J. Alloys Compd.*, 342(1-2), 110-114. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00153-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00153-6).
- [26] Singh, V. K., Barman, S. R. (2020.) Study of Single Grain Decagonal Al-Ni-Co Quasicrystal Surface. *AIP Conf. Proc.*, 2265, 1-7. <https://doi.org/10.1063/5.0016759>.
- [27] Nejdassattari, F., Stadnik, Z. M., Przewoznik, J., Grushko, B. (2016). Messbauer Spectroscopy, Magnetic and Ab-Initio Study of the Approximant Al₇₆Ni₉Fe₁₅ to a Decagonal Al-Ni-Fe Quasicrystal. *J. Alloys Compd.*, 662(1-2), 612-620. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.115>.
- [28] Setyawan, A. D., Louzguine, D. V., Sasamori, K., Kimura, H. M., Ranganathan, S., Inoue, A. (2005). Phase

- Composition and Transformation Behavior of Rapidly Solidified Al-Ni-Fe Alloys in α -Al-Decagonal Phase Region. *J. Alloys Compd.*, 399(1-2), 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.03.20>.
- [29] Hiraga, K., Park, K. T. (1996). High Resolution Electron Microscopy of Al-Ni-Fe Decagonal Quasicrystal. *J. Mater. Res.*, 11(7), 1702-1705. <https://doi.org/10.1557/JMR.1996.0213>.
- [30] Wolf, W., Bolfarini, C., Kiminami, C. S., Botta, W. J. (2020). Designing New Quasicrystalline Compositions in Al-Based Alloys. *J. Alloys Compd.* 823(1-2), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020>.
- [31] Bindi, L., Yao, N., Lin, C., Hollister, L. S., Andronicos, C. L., Distler, V. V., Eddy, M. P., Kostin, A., Kryachko, V., MacPherson, G. J., Steinhard, W. M., Yudovskaya, M. P., Steinhard, L. (2015). Natural Quasicrystal with Decagonal Symmetry. *Sci. Rep.*, 5, 1-5. <https://doi.org/10.1038/srep09111>.
- [32] Zou, Y., Kuczera, P., Wolny, J. (2016). Fitting the Long-Range Order of a Decagonal Quasicrystal. *Acta Phys. Pol. A*, 130(4), 845-847. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.130.845>.
- [33] 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>.
- [34] 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>.
- [35] Zhu, M., Yang, G., Yao, L., Cheng, S., Zhou, Y. (2010). Microstructure and Mechanical Properties of Al-Base Composites by Addition of Al-Ni-Co Decagonal Quasicrystalline Particles Through a Mechanical Stirring Route. *J. Mater. Sci.*, 45(14), 3727-3734. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4421-8>.
- [36] Babilas, R., Mlynarek, K., Lonski, W., Lis, M., Lukowicz, D., Kadziolka-Gawel, M., Warski, T., Radon, A. (2021). Analysis of Thermodynamic Parameters for Designing Quasicrystalline Al-Ni-Fe Alloys with Enhanced Corrosion Resistance. *J. Alloys Compd.*, 868(1-2), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159241>.
- [37] Sukhova, O. V., Polonsky, 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>.