

*Оксана ГЕРЦИК¹, Мирослава КОВБУЗ¹, Тетяна ГУЛА¹, Сергій КОРНІЙ²,
Наталія ПАНДЯК³*

**ВПЛИВ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОΡФНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА В
СУЛЬФАТНІЙ КИСЛОТІ**

¹*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 6, м. Львів, 79005, Україна. E-mail: djunjer1@gmail.com*

²*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна.*

³*Національний лісотехнічний університет України
вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна.*

*Oksana HERTSYK¹, Myroslava KOVBUZ¹, Tetiana HULA¹, Sergiy KORNIY²,
Nataliia PANDIAK³*

**INFLUENCE OF AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD ON THE
ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF AMORPHOUS ALLOYS BASED
ON IRON IN SULFURIC ACID**

¹*Ivan Franko National University of Lviv
6, Kyryla and Mefodiya St., 79005 Lviv, Ukraine. E-mail: djunjer1@gmail.com*

²*Karpenko physico-mechanical institute of the NAS of Ukraine
5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine.*

³*Ukrainian National Forestry University
General Chuprynka St., 103, Lviv, 79057, Ukraine.*

ABSTRACT

In investigation of the alloys corrosion resistance by cyclic voltammetry, the rate of scanning potentials is important. The electrochemical characteristics of amorphous alloys were determined at 10 and 50 mV/s rate. Investigation of the corrosion resistance of amorphous alloys by cyclic voltammetry at lower scanning rate makes it possible to evaluate the contribution of slower stages in corrosion processes on the surface of the studied amorphous alloys. It was determined that with the increase of the potential scanning rate, as well as with the increase of the pre-exposure time in an alternating magnetic field, the corrosion potentials shift to the anodic side, in particular, the Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0} alloy is passivated. According to the results of electrochemical investigation, the alloy Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4} proved to be more corrosion resistant, and the modification in the AMF causes an increase in its corrosion resistance, which is reflected in the shift of the potentials to the anodic side. After keeping in the alternating magnetic field of the Fe-based alloy samples, the elemental composition of the surface also changes. An increase in Fe content is observed. Therefore, the corrosion resistance of AMA samples is conditioned by the elemental composition of the samples and the corrosive environment. It was determined that the selection of the duration of keeping in an alternating magnetic field can change the physico-chemical properties of amorphous alloys.

KEY WORDS: *amorphous alloys, modification, alternating magnetic field, electrochemical characteristics, cyclic polarization, sulfuric acid.*

ВСТУП

У даний час майже всі сфери технічного застосування аморфних металевих сплавів (АМС) ґрунтуються на унікальному поєднанні хімічних, магнітних та механічних властивостей, які роблять аморфні метали одним з ключових елементів сучасних інформаційних технологій

[1, 2]. Важливим є також дослідження впливу різних видів модифікації, зокрема, змінним магнітним полем.

Досліджуючи вплив змінного магнітного поля (ЗМП) на властивості аморфних сплавів на основі Fe, необхідно враховувати особливості магнітних властивостей базового металу. Так, при кімнатній температурі феромагнетизмом володіють три чистих метали: залізо (Fe), нікель (Ni) і кобальт (Co). Характер впливу зовнішнього ЗМП на дифузійні процеси в сплавах визначається магнітними властивостями матриці, особливо у феромагнетних матеріалах. Експериментально визначено пришвидшувальний вплив змінного магнітного поля на контрольоване дифузією спікання феромагнетних часточок [3] у порівнянні зі швидкістю цього процесу, зумовленою ізотермічним відпалом. Слабке ЗМП суттєво впливає не тільки на дифузію, але і на формування фаз в металевих сплавах [4]. Таким чином, ЗМП чинить сильний вплив на дифузійні процеси у твердих металевих матеріалах, зумовлює в них гомогенізацію фаз, зміну компонентного складу доменів. Ці характеристики безпосередньо впливають на хімічну активність поверхні металевих матеріалів; тому як основний інструментальний спосіб тестування впливу ЗМП можна використовувати електрохімічні методики: хронопотенціометрію та вольтамперометрію.

В той же час, оцінюючи корозійну тривкість аморфних сплавів на основі Fe у розчинах сульфатної кислоти, необхідно враховувати взаємодію основного та всіх інших компонентів з цією кислотою. Fe за звичайної температури не взаємодіє із концентрованою сульфатною кислотою, тому що на поверхні утворюється нерозчинна плівка з його сполук [5].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

АМС на основі Fe: $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$, $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$, отримані на мідному барабані зі швидкістю охолодження розплаву 10^6 K/s у атмосфері гелію. Стрічки АМС товщиною $(20-25) \times 10^{-6}$ м виготовлені в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України [6]. За технологією отримання у стрічках АМС розрізняють контактну (к) поверхню, яка безпосередньо контактує з охолоджувальним елементом і зовнішню (з). Обидві поверхні різні як за хімічним елементним складом, так і за рівнем структурованості [7, 8].

Хронопотенціометричні та вольтамперометричні дослідження здійснювали з використанням приладу Jaissle Potentiostat-Galvanostat IMP 88PC-R. Як електрод порівняння застосовували насичений хлорсрібний, робочим електродом був зразок АМС (1 cm^2), а допоміжним – платинова пластинка (2 cm^2). Під час хронопотенціометрії фіксували початкове значення потенціалу (E_0) та після 20 min вимірювань (E_{20}); обчислювали різницю одержаних значень $\Delta E = E_{20} - E_0$. Потенціали (E_{corr}) та струми (i_{corr}) корозії розраховували після десяти циклів вольтамперометричного дослідження.

Мікроскопічні дослідження проводили на контактній стороні стрічки аморфного сплаву із використанням скануючого (растрового) електронного мікроскопу JSM-6480 фірми JEOL.

З метою модифікації, зразки аморфного сплаву витримували у ЗМП (430 mT, 50 Hz), яке створювали у спеціально сконструйованому пристрої [9]. Тривалість експозиції зразків у ЗМП – 30 та 60 min.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За результатами хронопотенціометричних досліджень (табл. 1) вихідних та попередньо витриманих 30 та 60 min у ЗМП, зразків АМС $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ у 0,5 М водному розчині H_2SO_4 , встановлено, що під час контакту з розчином сульфатної кислоти простежується зміщення потенціалів поверхонь в анодну сторону, тобто підвищення їхньої корозійної тривкості. Потенціали як контактної так і зовнішньої поверхонь є близькими і, практично, не залежать від тривалості впливу ЗМП, тобто сплав даного складу можна використовувати в таких умовах. Під час контакту з агресивним середовищем, очевидно, на поверхні АМС формуються нерозчинні сполуки, що зумовлюють підвищення її корозійної тривкості.

Вольтамперометричні дослідження електрохімічних характеристик АМС $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ у 0,5 М водному розчині сульфатної кислоти (рис. 1, табл. 2) показали, що під час контакту з агресивним середовищем в умовах циклічної зміни потенціалу, потенціал корозії зсувається в анодну сторону, що вказує на пасивацію поверхні, очевидно, за рахунок формування на поверхні щільних поверхневих шарів.

Таблиця 1. Результати потенціометричних досліджень у 0,5 М розчині H_2SO_4 попередньо модифікованого змінним магнітним полем аморфного сплаву $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$
 Table 1. Results of the potentiometric investigation in 0,5 M H_2SO_4 solution previously modified by alternating magnetic field amorphous alloy $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$

Тривалість модифікації, min	Поверхня	E_0 , V	E_{20} , V	ΔE , V
-	к	-0,42	-0,36	0,06
	з	-0,39	-0,36	0,03
30	к	-0,42	-0,37	0,05
	з	-0,41	-0,36	0,04
60	к	-0,41	-0,36	0,05
	з	-0,40	-0,36	0,04

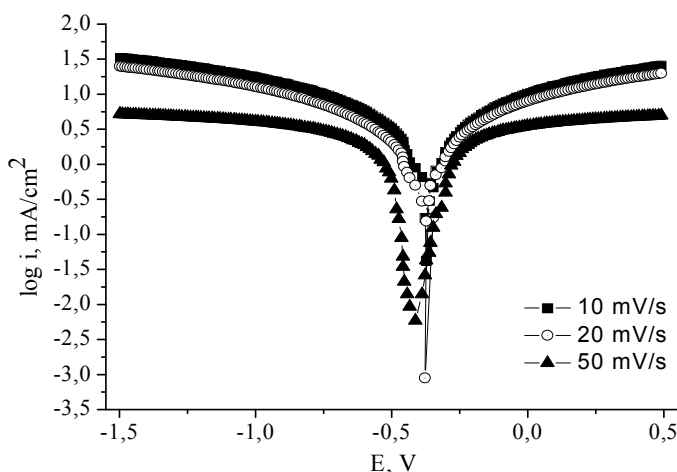


Рис. 1. Вольтамперограми (2-ий цикл) контактної поверхні стрічки $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ у 0,5 М водному розчині H_2SO_4 при різних швидкостях сканування потенціалу.
 Fig. 1. Voltamperograms (2nd cycle) of the contact surface of the $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ tape in 0.5 M H_2SO_4 aqueous solution at different potential scanning rates.

Однак простежується зсув потенціалу корозії в катодну сторону із збільшенням швидкості розгортки потенціалу, тобто в таких умовах відбувається руйнування захисних поверхневих шарів особливо контактної поверхні. Струми корозії при цьому змінюються неоднозначно, що вказує на протікання великої кількості окисно-відновних реакцій між компонентами сплаву та агресивним середовищем ще й в умовах циклічної зміни потенціалу. Тривкішою в умовах дослідження виявилася зовнішня поверхня сплаву $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$.

Таблиця 2. Електрохімічні параметри корозії стрічки аморфного сплаву $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ в залежності від кількості циклів сканування потенціалу ($v = 10, 20, 50$ mV/s) у 0,5 М водному розчині H_2SO_4
 Table 2. Electrochemical corrosion parameters of tape amorphous alloy $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ depending on the number of potential scanning cycles ($v = 10, 20, 50$ mV/s) in 0,5 M H_2SO_4 aqueous solution

№ циклу	10 mV/s		20 mV/s		50 mV/s	
	E_{corr} , V	$i_{corr} \cdot 10^5$, A/cm ²	E_{corr} , V	$i_{corr} \cdot 10^5$, A/cm ²	E_{corr} , V	$i_{corr} \cdot 10^5$, A/cm ²
Контактна поверхня						
1	-0,43	0,19	-0,42	0,13	-0,56	0,22
5	-0,35	1,07	-0,36	0,80	-0,42	0,96
10	-0,35	0,54	-0,36	0,32	-0,40	0,74
Зовнішня поверхня						
1	-0,41	1,33	-0,41	0,13	-0,42	0,17
5	-0,35	2,58	-0,36	0,82	-0,36	0,80
10	-0,35	1,53	-0,36	0,17	-0,36	0,32

Більш прецизійні дослідження корозійної тривкості модифікованих ЗМП зразків АМС проведені методом циклічної вольтамперометрії при швидкостях розгортки потенціалу 10 та 50 mV/s (рис. 2, табл. 3), тобто при додатковому навантаженні на сплав. Нижчі швидкості

розгортки потенціалу дають можливість оцінити вклад повільніших стадій в корозійні процеси на поверхні досліджуваного аморфного сплаву. Із збільшенням швидкості розгортки потенціалу, як і з збільшенням тривалості попереднього витримання у ЗМП потенціали корозії зсуваються в анодну сторону, тобто сплав пасивується.

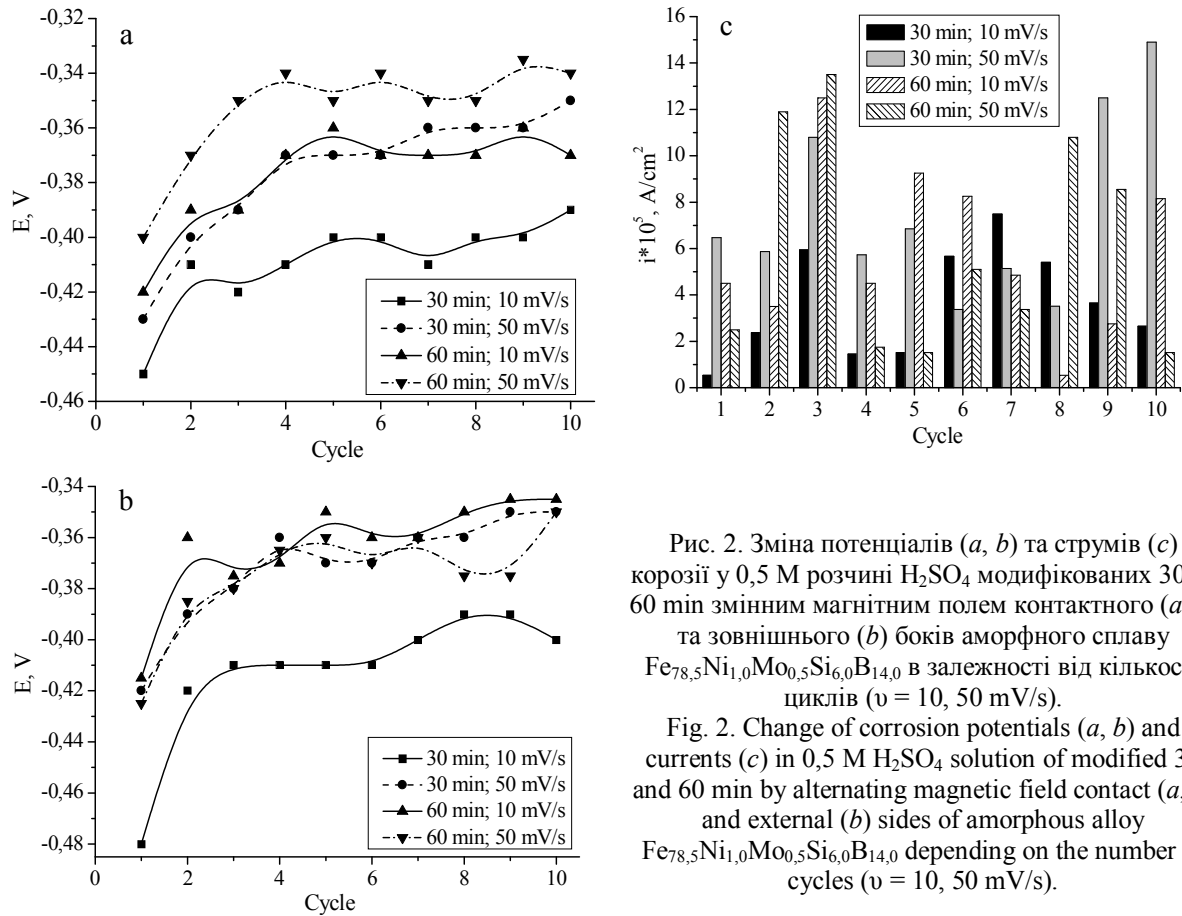


Рис. 2. Зміна потенціалів (a, b) та струмів (c) корозії у 0,5 М розчині H_2SO_4 модифікованих 30 та 60 мін змінним магнітним полем контактного (a, c) та зовнішнього (b) боків аморфного сплаву $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ в залежності від кількості циклів ($v = 10, 50$ мВ/с).

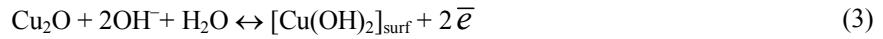
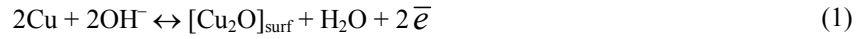
Fig. 2. Change of corrosion potentials (a, b) and currents (c) in 0,5 M H_2SO_4 solution of modified 30 and 60 min by alternating magnetic field contact (a, c) and external (b) sides of amorphous alloy $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ depending on the number of cycles ($v = 10, 50$ mV/s).

Таблиця 3. Електрохімічні параметри корозії у 0,5 М розчині H_2SO_4 попередньо витриманої 30 мін у змінному магнітному полі стрічки аморфного сплаву $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ в залежності від кількості циклів сканування потенціалу ($v = 10, 20, 50$ мВ/с)

Table 3. Electrochemical corrosion parameters in 0,5 M H_2SO_4 solution of modified 30 min in alternating magnetic field tape of amorphous alloy $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ depending on the number of potential scanning cycles ($v = 10, 20, 50$ mV/s)

Цикл	10 mV/s				50 mV/s			
	Контактна		Зовнішня		Контактна		Зовнішня	
	E_{corr}, V	$i_{corr} \cdot 10^5, A/cm^2$	E_{corr}, V	$i_{corr} \cdot 10^5, A/cm^2$	E_{corr}, V	$i_{corr} \cdot 10^5, A/cm^2$	E_{corr}, V	$i_{corr} \cdot 10^5, A/cm^2$
1	-0,45	0,54	-0,48	1,19	-0,43	6,47	-0,42	3,59
2	-0,41	2,38	-0,42	1,57	-0,40	5,87	-0,39	5,15
3	-0,42	5,94	-0,41	2,28	-0,39	10,8	-0,38	0,38
4	-0,41	1,45	-0,41	1,55	-0,37	5,73	-0,36	0,53
5	-0,40	1,52	-0,41	3,16	-0,37	6,85	-0,37	1,46
6	-0,40	5,67	-0,41	1,04	-0,37	3,37	-0,37	7,57
7	-0,41	7,49	-0,40	1,37	-0,36	5,14	-0,36	6,71
8	-0,40	5,41	-0,39	4,05	-0,36	3,51	-0,36	13,3
9	-0,40	3,65	-0,39	2,64	-0,36	12,5	-0,35	8,33
10	-0,39	2,65	-0,40	1,93	-0,35	14,9	-0,35	6,63

Усі фізико-хімічні властивості аморфних сплавів і, зокрема, їхня корозійна тривкість, суттєво залежать від їхнього елементного складу [10]. Наприклад, одночасно з розчиненням Fe можуть відбуватись наступні процеси, які визначають корозійну тривкість сплаву з додатками купруму та ніобію:



Крім того, ніобій адсорбує кисень, утворюючи тверді розчини. Оксиди Nb нижчих ступенів окиснення мають електронну провідність, а вищих ступенів окиснення (наприклад, Nb₂O₅), які є ковалентними сполуками і мають низьку електронну провідність, але створюють пасивуючий шар на поверхні АМС-електроду [11, 12].

Потенціометричні дослідження зразків АМС складу Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}, попередньо модифікованих ЗМП, у розчині H₂SO₄ показали (табл. 4), що збільшення тривалості експозиції у ЗМП сприяє пасивації зразків АМС даного складу, що відображається зсувом потенціалу у анодну сторону.

Таблиця 4. Результати потенціометричних досліджень у 0,5 М розчині H₂SO₄ попередньо модифікованого змінним магнітним полем аморфного сплаву Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}
Table 4. Results of the potentiometric investigation in 0,5 M H₂SO₄ solution previously modified by alternating magnetic field amorphous alloy Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}

Тривалість модифікації, min	Поверхня	E ₀ , V	E ₂₀ , V	ΔE, V
-	к	-0,39	-0,41	0,02
	з	-0,28	-0,41	0,13
30	к	-0,37	-0,34	0,03
	з	-0,35	-0,31	0,04
60	к	-0,35	-0,31	0,04
	з	-0,37	-0,38	0,01

На основі результатів оцінки корозійної тривкості сплаву Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4} у 0,5 М розчині H₂SO₄ методом циклічної вольтамперометрії (рис. 3, табл. 5) встановлено, що під час контакту з агресивним середовищем для модифікованих зразків як потенціал, так і струм корозії, змінюються несуттєво. Однак струм є, у 5-10 разів нижчим, ніж сплаву з додатками нікелю та молібдену. Збільшення швидкості сканування потенціалу від 10 до 50 mV/s знижує корозійну тривкість, потенціал зсувається у катодну сторону, а струми зростають. В цілому для даного сплаву корозійна тривкість залежить не стільки від тривалості модифікації у ЗМП, скільки від навантаження швидкістю циклічного сканування потенціалу.

Таблиця 5. Електрохімічні параметри корозії у 0,5 М розчині H₂SO₄ попередньо витриманої 30 min у змінному магнітному полі стрічки аморфного сплаву Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4} в залежності від кількості циклів сканування потенціалу (ν = 10, 20, 50 mV/s)

Table 5. Electrochemical corrosion parameters in 0,5 M H₂SO₄ solution of modified 30 min in alternating magnetic field tape of amorphous alloy Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4} depending on the number of potential scanning cycles (ν = 10, 20, 50 mV/s)

Цикл	10 mV/s				50 mV/s			
	Контактна		Зовнішня		Контактна		Зовнішня	
	E _{corr} , V	i _{corr} ·10 ⁵ , A/cm ²	E _{corr} , V	i _{corr} ·10 ⁵ , A/cm ²	E _{corr} , V	i _{corr} ·10 ⁵ , A/cm ²	E _{corr} , V	i _{corr} ·10 ⁵ , A/cm ²
1	-0,40	0,10	-0,44	0,33	-0,46	2,49	-0,45	1,50
2	-0,40	0,06	-0,40	0,62	-0,43	1,33	-0,45	2,77
3	-0,41	0,06	-0,40	0,44	-0,44	1,05	-0,44	0,89
4	-0,41	0,06	-0,39	0,18	-0,44	2,07	-0,43	0,86
5	-0,40	0,28	-0,41	0,33	-0,46	1,36	-0,43	0,90
6	-0,40	0,52	-0,41	0,37	-0,45	1,24	-0,43	0,32
7	-0,41	0,66	-0,42	0,37	-0,45	1,19	-0,44	0,35
8	-0,42	1,18	-0,40	0,50	-0,44	0,20	-0,43	1,13
9	-0,41	0,23	-0,42	0,27	-0,46	0,65	-0,44	1,56
10	-0,40	0,10	-0,41	0,58	-0,46	0,23	-0,43	1,13

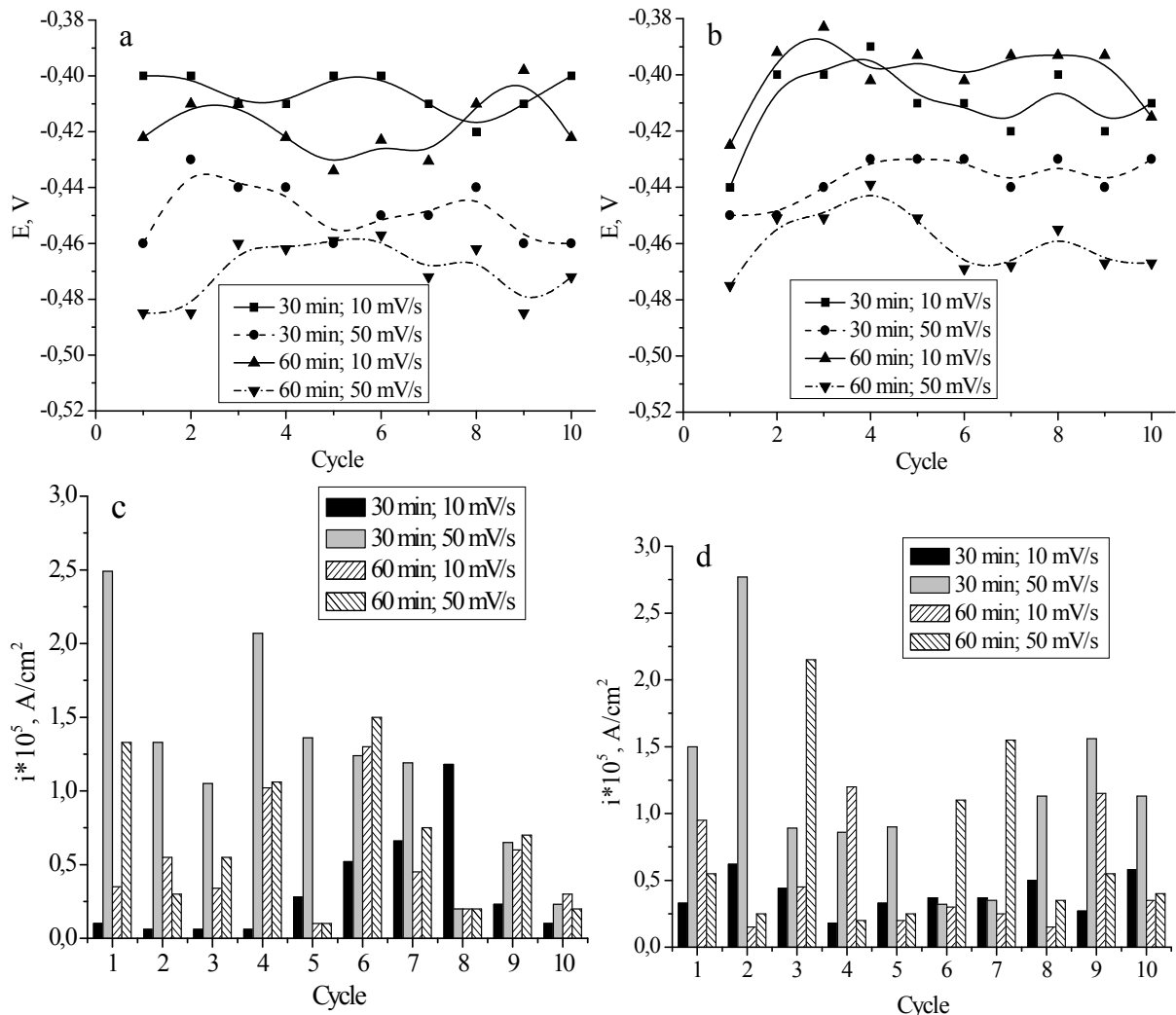


Рис. 3. Зміна потенціалів (a, b) та струмів (c, d) корозії у 0,5 М розчині H_2SO_4 модифікованих 30 та 60 min змінним магнітним полем контактного (a, c) та зовнішнього (b, d) боків аморфного сплаву $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$ в залежності від кількості циклів ($v = 10, 50$ mV/s).

Fig. 3. Change of corrosion potentials (a, b) and currents (c, d) in 0,5 M H_2SO_4 solution of modified 30 and 60 min by alternating magnetic field contact (a, c) and external (b, d) sides of amorphous alloy $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$ depending on the number of cycles ($v = 10, 50$ mV/s).

За допомогою електронного рентгенівського мікроаналізу встановлено елементний склад досліджуваних АМС до і після зовнішніх навантажень (табл. 6). Наведені результати є усередненими з 5 вимірів у різних точках поверхні. Попереднє витримання у ЗМП зразків $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0}$ та $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$, дещо інтенсифікує дифузію магнітосприйнятливих елементів, зокрема Fe, до поверхні і утворення захисних шарів. Для обох сплавів вплив ЗМП також сприяє значному виходу на поверхню бору, що може свідчити про утворення сполук бору із залізом. У поверхневих шарах сплаву $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$, підданого намагніченню, простежується підвищення at.% Cu, та Nb, які утворюють щільні оксидні шари [13].

Таблиця 6. Елементний склад вихідних аморфних сплавів і після магнітної модифікації
Table 6. Elemental composition of the initial amorphous alloys and after magnetic modification

Сплав	$Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0}$					$Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$				
	Fe	Ni	Mo	Si	B	Fe	Cu	Nb	Si	B
Вихідні зразки	78,50	1,00	0,50	14,0	6,00	73,10	1,00	3,00	15,5	7,40
60 min ЗМП	81,42	0,63	1,07	5,18	11,70	74,63	1,20	3,10	10,1	11,00

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив модифікації змінним магнітним полем (50 Hz) аморфних металевих сплавів $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$, $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$ на корозійну тривкість у 0,5 М водному розчині H_2SO_4 . Визначено електрохімічні характеристики аморфних сплавів на основі Fe з різними легуючими додатками у водних розчинах сульфатної кислоти. Показано, що корозійна тривкість зразків АМС визначається елементним складом зразків та характером агресивного середовища. Встановлено, що підбором тривалості експозиції в змінному магнітному полі можна змінювати фізико-хімічні властивості аморфних сплавів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойчишин Л.М., Герцик О.М., Ковбуз М.О. Морфологія, структура та властивості аморфних сплавів, легованих РЗМ. – Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2019. – 242 с.
2. Boichyshyn L.M., Hertsyk O.M., Kovbuz M.O. Thermal modification of amorphous metal alloys: nanostructuring and properties. – Mississauga, Ontario: Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Nova Printing Inc., 2019. – 138 p.
3. Кшнякін В.С., Опанасюк А.С., Дядюра К.О. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб. Ч. 2. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 291 с.
4. The influence of Ni or Co substitution for Fe on glass forming ability and magnetic properties in the quaternary Fe–Nb–B–Ni and (Fe, Ni, Co)–Nb–B alloy systems / Man Zhu, Sisi Chen, Lijuan Yao, Yanhong Li, Yan Wang, Zengyun Jian and Fan'ge Chang // Journal of Materials Research. – 2015. – Vol. 30, Is. 6. – P. 811–817.
5. Маклецов В.Г. Электрохимические свойства наноструктур на основе железа при кислотной коррозии // Вестн. Удм. ун-та. Физика. Химия. – 2011. – Вып. 2. – С. 30–42.
6. Бойчишин Л.М., Герцик О.М. Аморфні металеві сплави: структура, властивості, методи дослідження: навч. посіб. – Львів: ЛНУ ім. Ів. Франка, 2016. – 135 с.
7. Даниляк М.-О.М., Бойчишин Л.М. Особливості геометрії поверхні аморфних металевих сплавів // Пр. НТШ. Хім. науки. – 2018. – ЛІІІ. – С. 132–144.
8. Вплив складу агресивного середовища на корозійну тривкість багатокомпонентних аморфних сплавів на основі Fe / М.О. Ковбуз, О.М. Герцик, Т.Г. Переверзева, С.Є. Шурко, Н.Л. Пандяк, Х.В. Процишин // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 64–73.
9. Nanocrystallization of iron-based amorphous alloys, influence of magnetization in an alternating magnetic field / Tetiana Hula, Oksana Hertsyk, Myroslava Kovbuz, Andrii Yakymovych, Klaus W. Richter, Nataliia Pandiak // Chemistry of metals and alloys. – 2018. – Vol. 11, Is. 3/4. – P. 100–106.
10. Influence of alloying on the corrosion resistance of bulk amorphous alloys based on iron / O.M. Hertsyk, M.O. Kovbuz, L.M. Boichyshyn, T.G. Pereverzeva, O.V. Reshentyak // Materials Science. – 2017. – Vol. 53, Is. 3. – P. 330–336.
11. Kovbuz M.O., Hertsyk O.M., Bednarska L.M. The peculiarity of adsorption of inorganic and organic nitrogen containing compounds on amorphous metal surfaces // Adsorption Science and Technology. – 1999. – V. 17. – P. 565–574.
12. Li Liu, Ying Li, Fuhui Wahg. Electrochemical Corrosion Behaviour of Nanostructured Materials // Nanostructured Materials in Electrochemistry. – 2007. – P. 291–317.
13. Дія змінного магнітного поля на формування поверхневих захисних шарів Fe-Si-B-електродів у агресивних водних розчинах / О.М. Герцик, Т.Г. Переверзева, М.О. Ковбуз, Л.М. Бойчишин, В.К. Носенко, О.Ю. Руденко // Металлофіз. новейшие технол. – 2016. – Т. 38, № 7. – С. 889–902.