

## ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ПАРАМЕТРИ КОБАЛЬТОВИХ АМОΡФНИХ СПЛАВІВ У АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

О. М. ГЕРЦИК<sup>1</sup>, О. А. ЄЗЕРСЬКА<sup>2</sup>, В. К. НОСЕНКО<sup>3</sup>,  
Н. М. ГАВРИЛЯК<sup>1</sup>, Н. Л. ПАНДЯК<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка;

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung, Germany;

<sup>3</sup> Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ;

<sup>4</sup> Національний лісотехнічний університет України, Львів

Різними електрохімічними методами досліджено корозійну тривкість контактної та зовнішньої поверхонь стрічок аморфних металевих сплавів на основі кобальту  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$ ,  $\text{Co}_{73,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,5}\text{Si}_{5,3}\text{B}_{16,7}$ ,  $\text{Co}_{73,3}(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Mo}, \text{Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$  у водних розчинах  $\text{HCl}$ ,  $\text{NaCl}$  та  $\text{NaOH}$ . Встановлено найнижчу корозійну тривкість сплаву  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  у всіх досліджуваних агресивних середовищах. Часткова заміна  $\text{Co}$  та  $\text{Fe}$  на  $\text{Mn}$ , а також  $\text{Ni}$ ,  $\text{Mo}$  дещо її підвищує внаслідок формування щільних оксидних шарів на поверхні.

**Ключові слова:** кобальтові аморфні сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.

The corrosion resistance of contact and outer surfaces of strips of amorphous metal alloys based on cobalt  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$ ,  $\text{Co}_{73,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,5}\text{Si}_{5,3}\text{B}_{16,7}$ ,  $\text{Co}_{73,3}(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Mo}, \text{Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$  in aqueous solutions of  $\text{HCl}$ ,  $\text{NaCl}$  and  $\text{NaOH}$  was investigated. The  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  alloy has the lowest corrosion resistance in all investigated aggressive environments. Partial replacement of  $\text{Co}$  and  $\text{Fe}$  by  $\text{Mn}$ , as well as  $\text{Ni}$ ,  $\text{Mo}$  slightly increases the corrosion resistance of the material due to the formation of dense oxide layers on the surface.

**Keywords:** cobalt amorphous alloys, corrosion resistance, electrochemical characteristics.

**Вступ.** Аморфні металеві сплави (АМС) на основі  $\text{Co}$  мають високу корозійну тривкість у різних агресивних середовищах [1–13]. Вони, практично, не піддаються пitting корозії, навіть за анодної поляризації в розчинах натрій хлориду. Такі зразки належать до самозахисних сплавів, тобто можуть пасивуватися як в атмосферних умовах, так і в агресивних середовищах. Причинами, які зумовлюють таку високу корозійну тривкість, є хімічна однорідність матеріалу, відсутність на поверхні стрічки дефектів типу неметалічних включень, вакансій, дислокацій, а також висока хімічна активність АМС, яка сприяє швидкому утворенню поверхневої захисної плівки [1–5, 14].

Додатки майже всіх металічних елементів до аморфних сплавів типу метал–металоїд підвищують їх корозійну тривкість. Високою пасивністю володіють АМС, які містять у складі хром, завдяки якому формується плівка з гідрату оксигідрооксиду хрому ( $\text{CrO}_x(\text{OH})_{3-2x} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) зі сильними захисними властивостями. Густина анодного струму в області самопасивації залежить не тільки від вмісту хрому, але й молібдену. Цей додаток активніший, ніж основний металічний компонент сплаву. Поверхневі плівки, утворені  $\text{Mo}$ , менш стабільні, ніж пасивні плівки  $\text{Cr}$ . Однак

введення Мо гальмує швидкість розчинення в діапазоні активно-пасивного переходу. При цьому позитивний вплив Мо проявляється як в підвищенні захисної здатності поверхні, так і корозійної тривкості самої матриці сплаву. Такі активні метали, як Мо, концентруються в поверхневих захисних плівках, які формуються в активній зоні. Надлишкова концентрація Мо призводить до його нагромадження в пасивній плівці.

Найчастіше пасивувальні плівки – це оксиди, які є стійкішими до розчинення, ніж вихідні метали. У випадку Со рентгеноструктурні дослідження показали, що на поверхні можуть виникати оксиди різного складу  $Co_xO_y$ , які навіть змінюють кристалічність поверхневих шарів. Це впливає на електрохімічні параметри розчинення Со із різним ступенем окиснення. Інколи можуть співіснувати на поверхні різні оксиди, що зумовлює ступінчатий характер окиснення таких кобальтових електродів [10, 11, 13].

Важливими чинниками у складі АМС, які визначають його корозійну тривкість, є природа і кількість металоїду. Перевагою кобальтових сплавів порівняно із сплавами на основі Ni чи Fe є міцно адсорбована оксидна плівка.

У зв'язку з розширенням використання аморфних сплавів на основі кобальту, зокрема, для одержання водню, необхідно оцінити їхню корозійну тривкість у агресивних водних середовищах різного складу і рН.

**Експериментальна частина.** Оцінювали корозійну тривкість контактних та зовнішніх поверхонь стрічок аморфних сплавів на основі Со:  $Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$  (АМС-1),  $Co_{73,2}Fe_{4,3}Mn_{0,5}Si_{5,3}B_{16,7}$  (АМС-2),  $Co_{73,3}(Fe, Ni, Mo, Mn)_{5,7}(Si_{0,2}B_{0,8})_{21}$  (АМС-3), завтовшки  $(20...25) \cdot 10^{-6}$  м, які отримані в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Визначили електрохімічні параметри АМС у водних розчинах NaCl, HCl та NaOH при  $T = (293 \pm 1)$  К завдяки хронопотенціометричним та вольтамперометричним дослідженням (швидкість розгортки потенціалу 20 mV/s) з використанням Jaisle Potentiostat-Galvanostat IMP 88PC-R. Електродні потенціали вимірювали стосовно насиченого хлоридсрібного електрода порівняння і перераховували за водневим, робочий електрод – зразок АМС ( $1 \text{ cm}^2$ ), допоміжний – платинова пластинка ( $2 \text{ cm}^2$ ).

Досліджували методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS), використовуючи прилад Gamry Potentiostat Reference 600 з подальшою обробкою відповідною комп'ютерною програмою Gamry Echem Analyst. Для розрахунку складових імпедансу використовували схему, складену з двох резисторів та конденсатора ( $R_s(C_{dl}R_{ct})$ ), де  $R_s$  – опір електроліту;  $R_{ct}$  – опір переносу заряду та  $C_{dl}$  – елемент сталої фази, який характеризує ємність подвійного електричного шару.

**Результати та їх обговорення.** Хронопотенціометрична оцінка хімічної активності аморфних сплавів  $Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$ ,  $Co_{73,2}Fe_{4,3}Mn_{0,5}Si_{5,3}B_{16,7}$ ,  $Co_{73,3}(Fe, Ni, Mo, Mn)_{5,7}(Si_{0,2}B_{0,8})_{21}$  у 0,5 М водному розчині натрій хлориду (табл. 1) показала, що встановлення потенціалу як на контактній, так і на зовнішній поверхнях стрічки АМС відбувається зі зсувом його значення у катодну сторону, що вказує на агресивну дію хлорид йонів.

У розчині NaCl дещо тривкішою виявилася контактна поверхня сплавів. На кінетичних кривих чітко виділяються дві стадії розчинення поверхні, що зумовлено, очевидно, послідовним розчиненням окремих компонентів з різними окисно-відновними потенціалами.

Аналіз результатів хронопотенціометричних досліджень АМС у 0,1 М водному розчині хлоридної кислоти (табл. 1) показав, що порівняно зі середовищем NaCl, у ньому значення потенціалів поверхонь є додатнішими, що вказує на пасивувальну дію цього середовища стосовно досліджуваних кобальтових сплавів. Внаслідок зниження рН розчину частіше спостерігаємо зменшення потенціалу

поверхні в початковий період, що залежно від складу АМС зумовлює вищу тривалість його стабілізації.

**Таблиця 1. Електрохімічні параметри АМС електродів у водних розчинах**

Сплав	Поверхня	$-E_0$	$-E$	$\Delta E$
		V		
0,5 М NaCl				
$Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$	к	0,47	0,50	0,04
	з	0,45	0,51	0,05
$Co_{73,2}Fe_{4,3}Mn_{0,5}Si_{5,3}B_{16,7}$	к	0,45	0,49	0,04
	з	0,48	0,50	0,02
$Co_{73,3}(Fe,Ni,Mo,Mn)_{5,7}(Si_{0,2}B_{0,8})_{21}$	к	0,50	0,54	0,04
	з	0,47	0,55	0,08
0,1 М HCl				
$Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$	к	0,28	0,29	0,01
	з	0,32	0,33	0,01
$Co_{73,2}Fe_{4,3}Mn_{0,5}Si_{5,3}B_{16,7}$	к	0,26	0,31	0,05
	з	0,28	0,35	0,07
$Co_{73,3}(Fe,Ni,Mo,Mn)_{5,7}(Si_{0,2}B_{0,8})_{21}$	к	0,27	0,29	0,02
	з	0,37	0,45	0,08
0,1 М NaOH				
$Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$	к	0,36	0,37	0,01
	з	0,36	0,38	0,02
$Co_{73,2}Fe_{4,3}Mn_{0,5}Si_{5,3}B_{16,7}$	к	0,46	0,43	0,03
	з	0,41	0,39	0,02
$Co_{73,3}(Fe,Ni,Mo,Mn)_{5,7}(Si_{0,2}B_{0,8})_{21}$	к	0,42	0,47	0,05
	з	0,22	0,43	0,21

Порівняння кінетики встановлення потенціалу поверхні стрічок сплавів на основі кобальту у 0,1 М водному розчині NaOH також показало його вищу пасивувальну дію порівняно з розчинами NaCl (табл. 1). У лужному агресивному середовищі зі збільшенням кількості компонентів сплаву їх тривкість дещо знижується.

Незважаючи на різну природу легувальних додатків у досліджуваних сплавах, за агресивністю дії, згідно з визначеними значеннями потенціалів, водні розчини можна розмістити так: 0,5 М NaCl > 0,1 М NaOH > 0,1 М HCl. Така залежність, очевидно, пов'язана з різною природою реакції, яка визначає стаціонарний потенціал в кожному випадку.

Хронопотенціометрія характеризує процеси, які відбуваються на поверхні АМС без накладання зовнішнього потенціалу, тоді в умовах циклічної вольтамперометрії окисно-відновні процеси, очевидно, прискорюються, а поверхневі оксидні шари швидше руйнуються. Вольтамперограми знімалися впродовж 10 cycles зі швидкістю розгортання 20 mV/s в межах потенціалу від  $-0,8$  до  $0,2$  V у водних розчинах натрій гідроксиду та хлоридної кислоти та від  $-1,2$  до  $0$  V для водного розчину натрій хлориду.

Форма циклічних вольтамперограм АМС електродів суттєво залежить від складу агресивного середовища (рис. 1). На вольтамперограмах АМС  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  спостерігаємо досить чіткі переходи на анодних та катодних вітках, які описують почергові процеси окиснення і відновлення.

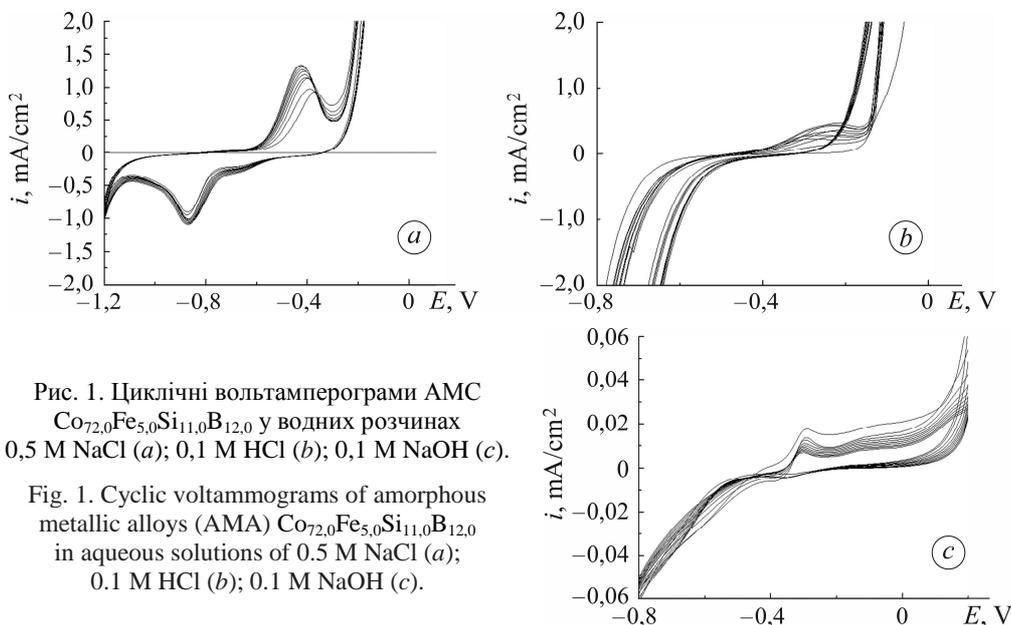


Рис. 1. Циклічні вольтамперограми АМС  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  у водних розчинах 0,5 М NaCl (а); 0,1 М HCl (b); 0,1 М NaOH (с).

Fig. 1. Cyclic voltammograms of amorphous metallic alloys (AMA)  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  in aqueous solutions of 0.5 M NaCl (a); 0.1 M HCl (b); 0.1 M NaOH (c).

Зокрема, у розчині натрій хлориду (рис. 1а) фіксуємо пік, який починає формуватися при  $-0,6$  V і відповідає утворенню сполук заліза, кількість яких зростає в умовах циклічної розгортки потенціалу і контакту з агресивним середовищем. На катодній кривій часткове відновлення продуктів корозії спостерігаємо за  $E = -0,7$  V, після якого відбувається виділення водню. На вольтамперограмах у розчині хлоридної кислоти (рис. 1b) також фіксуємо пік при  $E = -0,6$  V, висота якого суттєво менша через розчинність продуктів корозії заліза. Різке зростання струмів за подальшої поляризації  $E = -0,3$  V свідчить про активне розчинення кобальту. Форма вольтамперограми у розчині натрій гідроксиду (рис. 1с) підтверджує пасивацію електрохімічно активних компонентів сплаву Co та Fe. Як в розчині кислоти, так і лугу фіксуємо виділення водню.

Визначені значення потенціалів ( $E_{\text{сог}}$ ) та струмів корозії ( $i_{\text{сог}}$ ) першого та десятого циклів окисно-відновних процесів досліджуваних АМС (рис. 2; табл. 2) підтверджують найнижчу корозійну тривкість зразків у водному розчині NaCl, що відображається найвід'ємнішими потенціалами та найвищими струмами корозії під час першого циклу.

Сплав  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  має найнижчу корозійну тривкість у всіх досліджуваних агресивних середовищах. Часткова заміна Co та Fe на Mn, а також Ni, Mo дещо її підвищує, очевидно, внаслідок утворення щільних оксидних шарів на поверхні.

Потенціали корозії АМС на основі Co в середовищі 0,5 М водного розчину NaCl та 0,1 М HCl зсуваються в катодний бік, а у 0,1 М водному розчині NaOH – в анодний (рис. 2; табл. 2). Такий ефект зумовлений особливостями реакцій, які визначають потенціал. У розчині натрій хлориду – це розчинення заліза з утворенням оксидно-гідроксидних сполук, а у розчинах HCl і NaOH – розчинення кобальту. Зміщення потенціалу у від'ємніший бік свідчить про збільшення швидкості анодних процесів, тобто агресивності середовища, тоді як у розчині лугу анодні реакції блокуються внаслідок утворення гідроксиду кобальту.

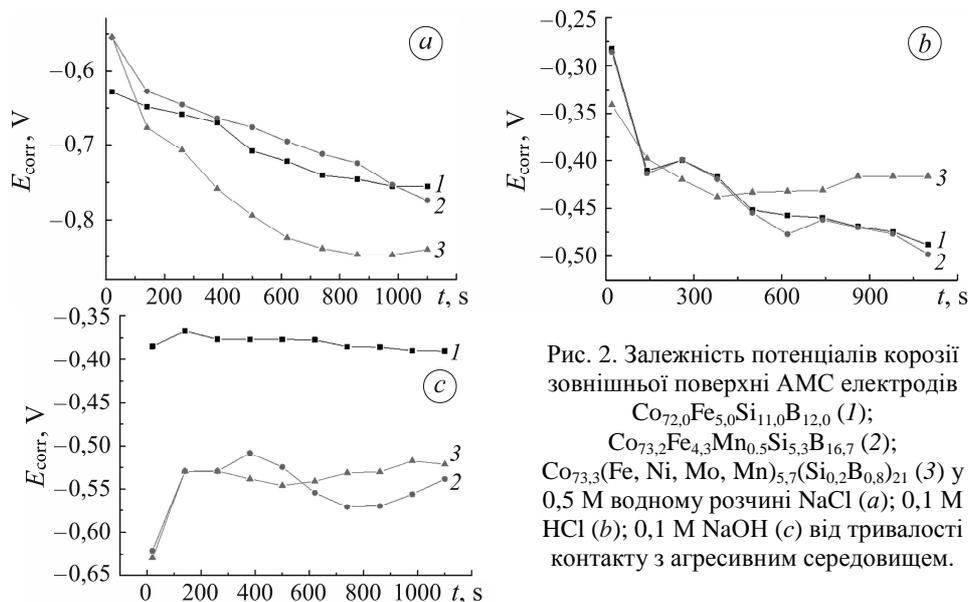


Рис. 2. Залежність потенціалів корозії зовнішньої поверхні АМС електродів  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  (1);  $\text{Co}_{73,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,5}\text{Si}_{5,3}\text{B}_{16,7}$  (2);  $\text{Co}_{73,3}(\text{Fe, Ni, Mo, Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$  (3) у 0,5 М водному розчині NaCl (a); 0,1 М HCl (b); 0,1 М NaOH (c) від тривалості контакту з агресивним середовищем.

Fig. 2. Dependence of the corrosion potentials of the outer surface of AMA electrodes  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$  (1);  $\text{Co}_{73,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,5}\text{Si}_{5,3}\text{B}_{16,7}$  (2);  $\text{Co}_{73,3}(\text{Fe, Ni, Mo, Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$  (3) in 0.5 M NaCl aqueous solution (a); 0.1 M HCl (b); 0.1 M NaOH (c) on the time of contact with an aggressive environment.

**Таблиця 2. Електрохімічні параметри розчинення АМС електродів у водних розчинах**

Цикл	Поверхня	0,5 М NaCl		0,1 М HCl		0,1 М NaOH	
		$-E_{\text{corr}}$ V	$i_{\text{corr}}$ A/m <sup>2</sup>	$-E_{\text{corr}}$ V	$i_{\text{corr}}$ A/m <sup>2</sup>	$-E_{\text{corr}}$ V	$i_{\text{corr}}$ A/m <sup>2</sup>
$\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$							
1	к	0,76	0,01	0,30	0,007	0,42	0,0007
	з	0,63	0,02	0,28	0,005	0,38	0,004
10	к	0,82	0,03	0,46	0,04	0,35	0,005
	з	0,76	0,04	0,47	0,06	0,42	0,0007
$\text{Co}_{73,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,5}\text{Si}_{5,3}\text{B}_{16,7}$							
1	к	0,68	0,05	0,30	0,007	0,35	0,008
	з	0,56	0,02	0,28	0,005	0,62	0,001
10	к	0,83	0,01	0,50	0,04	0,36	0,001
	з	0,70	0,005	0,47	0,06	0,56	0,0007
$\text{Co}_{73,3}(\text{Fe, Ni, Mo, Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$							
1	к	0,56	0,03	0,37	0,005	0,35	0,007
	з	0,55	0,08	0,34	0,04	0,63	0,003
10	к	0,75	0,01	0,47	0,15	0,42	0,002
	з	0,85	0,05	0,16	0,09	0,52	0,001

Метод електрохімічної імпедансної спектроскопії дав змогу оцінити опір, який створюють поверхневі шари аморфних сплавів на основі Со компонентам

агресивного середовища, що важливо в дослідженні корозійної тривкості (табл. 3). Відповідні параметри у 0,5 М водному розчині NaCl розраховані за еквівалентною електродною схемою. Більші значення опорів як контактної, так і зовнішньої поверхонь спостерігаємо у багатокомпонентному сплаві, що корелює з результатами вольтамперометричних досліджень.

**Таблиця 3. Результати вимірювань АМС у 0,5 М водному розчині NaCl методом електрохімічної імпедансної спектроскопії**

Сплав	Поверхня	$R_s$ , $\Omega$	$E$ , V	$R_{ct}$ , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$C_{dl} \cdot 10^4$ , $\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$	$\alpha$
$\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$	к	22,88	-0,54	619	1,41	0,65
	з	47,98	-0,53	2527	0,44	0,78
$\text{Co}_{73,3}(\text{Fe},\text{Ni},\text{Mo},\text{Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$	к	45,88	-0,55	101840	0,06	0,75
	з	53,72	-0,56	62974	0,05	0,83

### ВИСНОВКИ

Дослідження електрохімічної корозії контактної та зовнішньої поверхонь аморфних металевих сплавів  $\text{Co}_{72,0}\text{Fe}_{5,0}\text{Si}_{11,0}\text{B}_{12,0}$ ,  $\text{Co}_{73,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,5}\text{Si}_{5,3}\text{B}_{16,7}$  та  $\text{Co}_{73,3}(\text{Fe},\text{Ni},\text{Mo},\text{Mn})_{5,7}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{21}$  у водних розчинах HCl, NaCl та NaOH показали їх різну корозійну тривкість. Незважаючи на різну природу легувальних додатків у досліджуваних АМС, згідно з хронопотенціометричними дослідженнями, за агресивністю дії водні розчини можна розмістити так: 0,5 М NaCl > 0,1 М NaOH > > 0,1 М HCl. На вольтамперограмах АМС спостерігали досить чіткі переходи на катодних вітках, які описують насамперед розряд молекул води з утворенням молекулярного водню. Ця властивість АМС визначає можливість їх застосування як матеріалів для одержання молекулярного водню.

*Результати досліджень отримано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації держбюджетної теми: 0123U101830 “Нанокристалізація аморфних сплавів на основі кобальту: кінетика, властивості, застосування”).*

*This work was partly supported by the Simons Foundation (Award Number: 1290588).*

1. *Ultra-soft magnetic Co–Fe–B–Si–Nb amorphous alloys for high frequency power applications / K. Ackland, A. Masood, S. Kulkarni, and P. Stamenov // AIP Adv. – 2018. – 8. – Article number 056129. DOI:10.1063/1.5007707*
2. *Magnetic properties and nanocrystallization behavior of Co-based amorphous alloy / Y. Nykyruy, S. Mudry, Y. Kulyk, V. Prunitsa, and A. Borysiuk // Phys. Chem. Solid State. – 2023. – 24, № 1. – P. 106–113. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.1.106-113>*
3. *Magnetic properties and nanocrystallization process in Co–(Me)–Si–B amorphous ribbons / Y. Nykyruy, S. Mudry, Y. Kulyk, and A. Borisyuk // Appl. Nanosci. – 2023. – 13, № 7. – P. 5239–5249. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02746-6>*
4. *Thermally induced microstructural transformations and anticorrosion properties of  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$  amorphous alloy / Milica M. Vasic, Tomas Zak, Nadezda Pizurova, Pavla Roupцова, Dusan M. Minic, Dragica M. Minic // J. Non-Cryst. Solids. – 2018. – 500. – P. 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.08.017>*
5. *Surface structure and properties of metallic glasses / D. V. Louzguine-Luzgin, A. S. Trifonov, and A. Yu. Churymov // J. Alloys Compd. – 2018. – 742. – P. 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.290>*

6. *Microstructure* and mechanical properties of Co-based alloy coatings fabricated by laser cladding and plasma arc spray welding / J. Zhao, Q. Gao, H. Wang, F. Shu, H. Zhao, W. He, and Z. Yu // *J. Alloys Compd.* – 2019. – **785**. – P. 846–854.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.056>
7. Hasegawa R. Applications of amorphous magnetic alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2004. – **375–377**. – P. 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.258>
8. Burkov A. A. and Chigrin P. G. Effect of tungsten, molybdenum, nickel and cobalt on the corrosion and wear performance of Fe-based metallic glass coatings // *Surf. Coat. Technol.* – 2018. – **351**. – P. 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.078>
9. *Microstructures* and mechanical properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy coatings by detonation spraying / W.-B. Liao, Z. X. Wu, W. Lu, M. He, T. Wang, Z. Guo, and J. Huang // *Intermetallics.* – 2021. – **132**. – Article number 107138.  
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107138>
10. Badawy W., Al-Kharafi F., and Al-Ajmi J. Electrochemical behaviour of cobalt in aqueous solutions of different pH // *J. Appl. Electrochem.* – 2000. – **30**. – P. 693–704.  
<https://doi.org/10.1023/A:1003893122201>
11. *Electrochemical* properties of ternary amorphous alloys based on iron and cobalt in alkali solutions / L. Boichyshyn, O. Hertsyk, M. Lopachak, M. Kovbuz, T. Hula, and N. Pandyak // *Materials Science.* – 2020. – **55**, № 5. – P. 703–709.  
<https://doi.org/10.1007/s11003-020-00361-w>
12. Zhang B. H., Liu J. H., and Zhou H. T. Comprehensive study of the crystallization behavior, thermal stability, and magnetic properties of  $\text{Co}_{66.5}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{12}\text{Fe}_4\text{Ni}_2$  amorphous ribbon // *J. Non-Cryst. Solids.* – 2021. – **573**, № 1. – Article number 121132.  
DOI:10.1016/j.jnoncrysol.2021.121132
13. *Corrosion* resistance of  $\text{Co}_{77}\text{Si}_{11}\text{B}_{12}$  amorphous metal alloys for the electrodes of hydrogen release from alkaline solutions / M. Lopachak, Kh. Khrushchuk, V. Dnistryan, L. Boichyshyn, and O. Reshetnyak // *Materials Science.* – 2021. – **56**, № 5. – P. 673–677.  
<https://doi.org/10.1007/s11003-021-00481-x>
14. Lopachak M., Boichyshyn L., and Nosenko V. Electrochemical behavior of cobalt-based nanostructured amorphous alloys in alkaline solution // *Proc. of the 2023 IEEE 13<sup>th</sup> Int. Conf. Nanomaterials: Appl. and Properties.* – Bratislava, 2023. – P. EN021–EN024.

Одержано 23.03.2024