

ВПЛИВ СКЛАДУ АМОΡФНИХ СПЛАВІВ НА ЇХ КОРОЗІЙНУ ТРИВКІСТЬ У РІЗНИХ ЗА АГРЕСИВНІСТЮ СЕРЕДОВИЩАХ

О. М. ГЕРЦИК¹, Т. Г. ГУЛА¹, О. А. ЄЗЕРСЬКА², В. К. НОСЕНКО³,
С. А. КОРНІЙ⁴, М. С. ТАШАК⁵

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

² Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung, Germany;

³ Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ;

⁴ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

⁵ Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено вплив елементного складу стрічкових аморфних сплавів на основі заліза ($\text{Fe}_{80,0}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$, $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$, $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$) на корозійну тривкість у 0,5 М водних розчинах NaCl; HCl та KOH при $T = (293 \pm 1)$ К. Встановлено, що сплави $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$ і $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ є корозійно тривкими в агресивних середовищах. Електрохімічні параметри, отримані як методом циклічної вольтамперометрії, так і електрохімічної імпедансної спектроскопії, вказують на формування на них поверхневих плівок у 0,5 М водному розчині калій гідроксиду. Експериментально доведено, що йони Cl^- (особливо за низьких pH) за тривалої дії є помітно агресивнішими окисниками аморфних сплавів проти OH^- -йонів. Під час утворення пасивувальної плівки у сильних окиснювальних середовищах активно розчиняються ті елементи сплаву, що не задіяні у цьому процесі, а основні плівкотвірні нагромаджуються під плівкою, посилюючи її захисні властивості.

Ключові слова: аморфні металеві сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.

The influence of the elemental composition of strip amorphous alloys $\text{Fe}_{80,0}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$, $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$, $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$ on corrosion resistance in 0.5 M aqueous solutions of NaCl, HCl and KOH at $T = (293 \pm 1)$ K was investigated. Higher corrosion resistance in aggressive environments of $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$ and $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ alloy was established. Electrochemical parameters obtained both by the method of cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy indicate the formation on them of more durable surface layers in a 0.5 M potassium hydroxide aqueous solution. The Cl^- ions (especially at low pH) under their long-term action are the more aggressive oxidizers of amorphous alloys to compare to OH^- ions. During the passive film formation in highly aggressive environments such alloy elements, which do not participate in this process, are dissolved, and the main film forming elements are accumulated under the film, thus improving its protective properties.

Keywords: amorphous alloys, corrosion resistance, electrochemical characteristics.

Вступ. Один із напрямків практичного використання аморфних та нанокристалічних стрічкових сплавів пов'язаний зі заміною традиційних кристалічних матеріалів з метою енергозбереження [1, 2]. Очевидно, що властивості таких матеріалів та можливості їх застосування визначають, у першу чергу, структура та елементний склад [3–13]. Наприклад, сплави на основі заліза, зокрема, FINEMET ($\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$), одержують у вигляді аморфної стрічки швидким загартуванням розплаву ($\sim 10^6$ К/с). Він містить Fe; Si; B і невелику кількість Cu та Nb,

а також кристалічні зерна розміром до десяти нанометрів, які утворюють однорідну структуру. Таким аморфним металевим сплавам (АМС) притаманні відмінні магнетом'які властивості за їх часткової кристалізації [14].

Безумовно, що під час їх використання необхідно оцінити корозійну тривкість у агресивних середовищах різного складу. Йони середовища можуть взаємодіяти з компонентами сплаву, утворюючи розчинні та нерозчинні продукти корозії [5–13]. Під час вивчення корозійної тривкості слід також враховувати, що поверхня таких сплавів вже у вихідному стані вкрита оксидною плівкою, в якій енергія зв'язку Me–O вища, ніж у кристалічних [1]. Мета дослідження – оцінити корозійну тривкість аморфних сплавів у агресивних середовищах з різним рН, щоб передбачити можливість їх використання на практиці.

Експериментальна частина. Досліджували корозійну тривкість контактних та зовнішніх поверхонь стрічок АМС $\text{Fe}_{80,0}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$; $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$; $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$; $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$ завтовшки $(20\ldots 25) \cdot 10^{-6}$ м, які отримали методом надшвидкого охолодження розплаву в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Щоб визначити їх електрохімічні параметри в 0,5 М водних розчинах NaCl; HCl; КОН при $T = (293 \pm 1)$ К, виконували вольтамперометричні дослідження (швидкість розгортання потенціалу 20 мВ/с; тривалість розгортки $(-1,5 \ldots +0,5)$ В ~ 100 с), використовуючи Jaissle Potentiostat-Galvanostat IMP 88PC-R. Як електрод порівняння вживали насичений хлоридсрібний, як робочий – зразок АМС (1 cm^2), як допоміжний – платинову пластину (2 cm^2). Потенціали ($E_{\text{соп}}$) та струми ($i_{\text{соп}}$) корозії розраховували за відповідними вольтамперограмами.

Для дослідження методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (ЕІС) застосовували Gamry Potentiostat Reference 600 з подальшим обробленням спектрів комп'ютерною програмою Gamry Echem Analyst. Складники імпедансу розраховували за схемою, складеною з двох резисторів та конденсатора ($R_s(C_{dl}R_{ct})$), де R_s – опір електроліту; R_{ct} – опір перенесенню заряду та C_{dl} – елемент сталої фази, що характеризує ємність подвійного електричного шару.

Результати та їх обговорення. Аналіз результатів електрохімічного дослідження низки АМС у 0,5 М водному розчині NaCl засвідчив (табл. 1), що потенціали корозії багатокомпонентного сплаву $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$ в умовах циклічної поляризації знаходяться в межах $(-0,65 \ldots -0,71)$ В.

Таблиця 1. Параметри електрохімічного окиснення контактної (к) та зовнішньої (з) поверхонь стрічок сплавів у 0,5 М водному розчині NaCl, $T = (293 \pm 1)$ К

Цикли	Поверхня	Сплави					
		$\text{Fe}_{80,0}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$		$\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$		$\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$	
		$-E_{\text{соп}}, \text{ В}$	$i_{\text{соп}} \cdot 10^4, \text{ А/см}^2$	$-E_{\text{соп}}, \text{ В}$	$i_{\text{соп}} \cdot 10^4, \text{ А/см}^2$	$-E_{\text{соп}}, \text{ В}$	$i_{\text{соп}} \cdot 10^4, \text{ А/см}^2$
1	к	0,70	2,72	0,92	1,04	0,65	1,04
	з	0,80	3,34	0,94	0,38	0,68	1,37
5	к	0,76	2,45	0,93	4,32	0,70	2,32
	з	0,81	3,42	0,91	1,24	0,67	2,44
10	к	0,78	3,23	0,97	2,86	0,68	2,86
	з	0,81	2,72	0,97	1,80	0,71	3,09

Для інших сплавів вони від'ємніші, зокрема, для сплаву становлять $\text{Fe}_{80}\text{Si}_{6}\text{B}_{14}$ $(-0,7 \ldots -0,81)$ В, а для $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ $(-0,92 \ldots -0,97)$ В (табл. 1). Значення густини струмів корозії сплавів із різними легувальними додатками під час початкових циклів нижчі, що може свідчити про невеликі швидкості окис-

нення, проте далі стають сумірними зі швидкістю розчинення базового сплаву $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$. Інтервал пасивності для контактної поверхні сплаву $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ (рис. 1) зменшується за десять циклів від 1,02 до 0,47 V, що загалом підтверджує руйнівний вплив циклічного розгортання потенціалу. Найвищу корозійну тривкість у цьому розчині має сплав $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$.

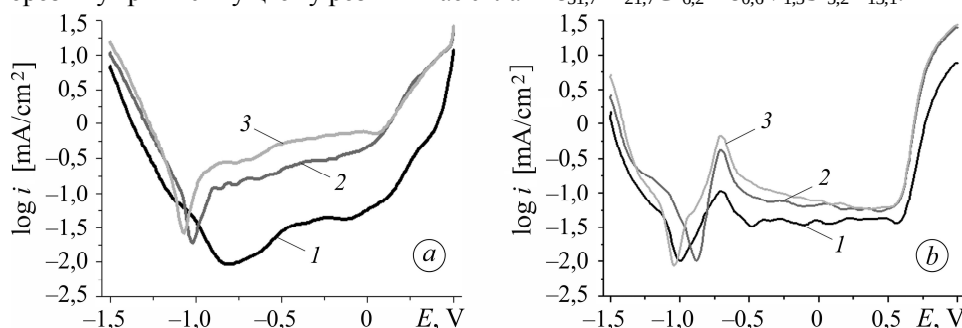


Рис. 1. Вольтамперограми контактних поверхонь сплаву $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ у 0,5 М розчині NaCl (а) та сплаву $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ у 0,5 М розчині KOH (б) (1–3 – перший, п'ятий та десятий цикли), $T = (293 \pm 1)$ К.

Fig. 1. Voltamperograms of the contact surfaces of the $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ alloy in 0.5 M NaCl solutions (a) and $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ in 0.5 M KOH solutions (b) (1 – the first; 2 – the fifth; 3 – the tenth cycles), $T = (293 \pm 1)$ K.

За циклічними вольтамперограмами оцінили ступінь оборотності окисно-відновних електрохімічних процесів сплавів у 0,5 М розчинах NaCl (табл. 2). Зсув піків анодної та катодної віток відносно осі потенціалів (ΔE) до 100 mV свідчить про підвищену оборотність. Лише для контактної поверхні сплаву $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ (табл. 2) процес виявився оборотним ($\Delta E = 60$ mV), а у всіх інших випадках за значень 220...550 mV – необоротним за умов формування оксидних нерозчинних поверхневих шарів. Наприклад, у сплаві $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ – це сплав Nb_2O_5 , а у $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$ – це можуть бути оксиди ванадію, які погано розчиняються у воді та кислотах [15, 16].

Таблиця 2. Відстані між анодними (E_1) та катодними (E_2) піками (оборотність процесу) для другого циклу вольтамперометричного дослідження АМС у 0,5 М водному розчині NaCl, $T = (293 \pm 1)$ К

Сплав	Поверхня	E_1	E_2	$ \Delta E $
		V		
$\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$	к	–0,44	–0,50	0,06
	з	–0,34	–0,61	0,27
$\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$	к	–0,20	–0,75	0,55
	з	–0,16	–0,59	0,43
$\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$	к	0,05	–0,34	0,39
	з	0,10	–0,12	0,22

Корозійну тривкість зразків визначали також у присутності агресивних протонів та хлорид-йонів, які суттєво впливають на хімічний опір поверхні АМС у 0,5 М водному розчині HCl (табл. 3). Металеві компоненти сплавів взаємодіють з кислотою, формуючи розчинні та нерозчинні продукти. Наприклад, залізо, нікель, мідь за кімнатної температури утворюють хлориди відповідних металів, які розчиняються у воді, а тому не сприяють тривалому корозійному опору, тоді як інші металеві компоненти формують нерозчинні або слаботорозчинні хлориди. Цим пояснюють найвищу корозійну тривкість у кислоті сплаву $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$.

про що свідчать як додатніші потенціали, так і найнижчі струми корозії. Причому струми зменшуються втричі за контакту зі середовищем і за циклічної зміни потенціалу. Найінтенсивніше тут кородує сплав, легований Cu та Nb.

Сплави на основі заліза пасивуються в лужних середовищах за pH 10...14 внаслідок виникнення оксидів Fe_2O_3 та Fe_3O_4 , а з часом – гідроксидів $\text{Fe}(\text{OH})_2$ та $\text{Fe}(\text{OH})_3$ зі задовільними ізолювальними властивостями. Під час формування щільних оксидно-гідроксидних шарів важливу роль відіграють легувальні добавки – Mo, Ni, а також Si та B (рис. 1b). На вольтамперограмах сплаву $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ у 0,5 М водному розчині КОН присутня пасиваційна ділянка, ширина якої мало змінюється під час контакту з агресивним середовищем за циклічної зміни потенціалу.

Таблиця 3. Параметри електрохімічного окиснення контактної (к) та зовнішньої (з) поверхонь стрічок АМС у агресивних середовищах різного складу, $T = (293 \pm 1) \text{ K}$

Цик- ли	Поверхня	Сплав			
		Fe _{80,0} Si _{6,0} B _{14,0}		Fe _{78,5} Ni _{1,0} Mo _{0,5} Si _{6,0} B _{14,0}	
		$-E_{\text{согг}}, \text{ V}$	$i_{\text{согг}} \cdot 10^4, \text{ A/cm}^2$	$-E_{\text{согг}}, \text{ V}$	$i_{\text{согг}} \cdot 10^4, \text{ A/cm}^2$
0,5 М НCl					
1	к	0,47	0,60	0,44	2,87
	з	0,46	1,01	0,40	3,01
5	к	0,46	1,11	0,40	4,26
	з	0,47	1,48	0,37	2,85
10	к	0,45	1,37	0,38	4,46
	з	0,45	2,85	0,40	3,01
0,5 М KOH					
1	к	0,81	1,28	1,00	0,59
	з	0,69	1,82	0,92	1,27
5	к	0,89	0,93	1,01	0,36
	з	0,72	2,12	0,98	1,55
10	к	0,95	1,85	1,04	0,73
	з	0,75	3,41	1,01	1,71
Цик- ли	Поверхня	Fe _{73,1} Cu _{1,0} Nb _{3,0} Si _{15,5} B _{7,4}		Fe _{51,7} Ni _{21,7} Cr _{6,2} Mo _{0,6} V _{1,5} Si _{5,2} B _{13,1}	
		$-E_{\text{согг}}, \text{ V}$	$i_{\text{согг}} \cdot 10^4, \text{ A/cm}^2$	$-E_{\text{согг}}, \text{ V}$	$i_{\text{согг}} \cdot 10^4, \text{ A/cm}^2$
		0,5 М НCl			
1	к	0,44	1,25	0,18	1,41
	з	0,56	8,02	0,21	0,96
5	к	0,46	3,22	0,21	0,68
	з	0,58	5,63	0,18	0,78
10	к	0,52	2,42	0,21	0,58
	з	0,54	6,16	0,19	0,71
0,5 М KOH					
1	к	0,78	2,20	0,56	0,81
	з	0,76	1,16	0,58	0,72
5	к	0,75	2,51	0,56	0,94
	з	0,76	1,94	0,51	0,83
10	к	0,82	1,85	0,59	0,72
	з	0,84	1,25	0,57	0,86

Зіставляли значення електрохімічних параметрів АМС у 0,5 М розчині КОН (табл. 3), виявили, що і тут найтривкіший багатокomпонентний сплав

$\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$, оскільки його потенціали корозії найдодатніші, струми корозії найнижчі і слабо змінюються в умовах експерименту. Однак загалом нижчі значення струмів корозії сплаву, очевидно, пов'язані з формуванням нерозчинних гідроксидів. Наприклад, корозійну тривкість цього сплаву підвищують добавки V; Cr; W. За звичайних умов ванадію притаманна висока хімічна тривкість, тому він розчиняється лише в концентрованих кислотах за нагрівання. В ряду Cr–Mo–W хімічна активність помітно знижується. Методом ЕІС можна оцінити опір АМС поверхневих шарів, сформованих на них компонентам агресивного середовища (рис. 2; табл. 4).

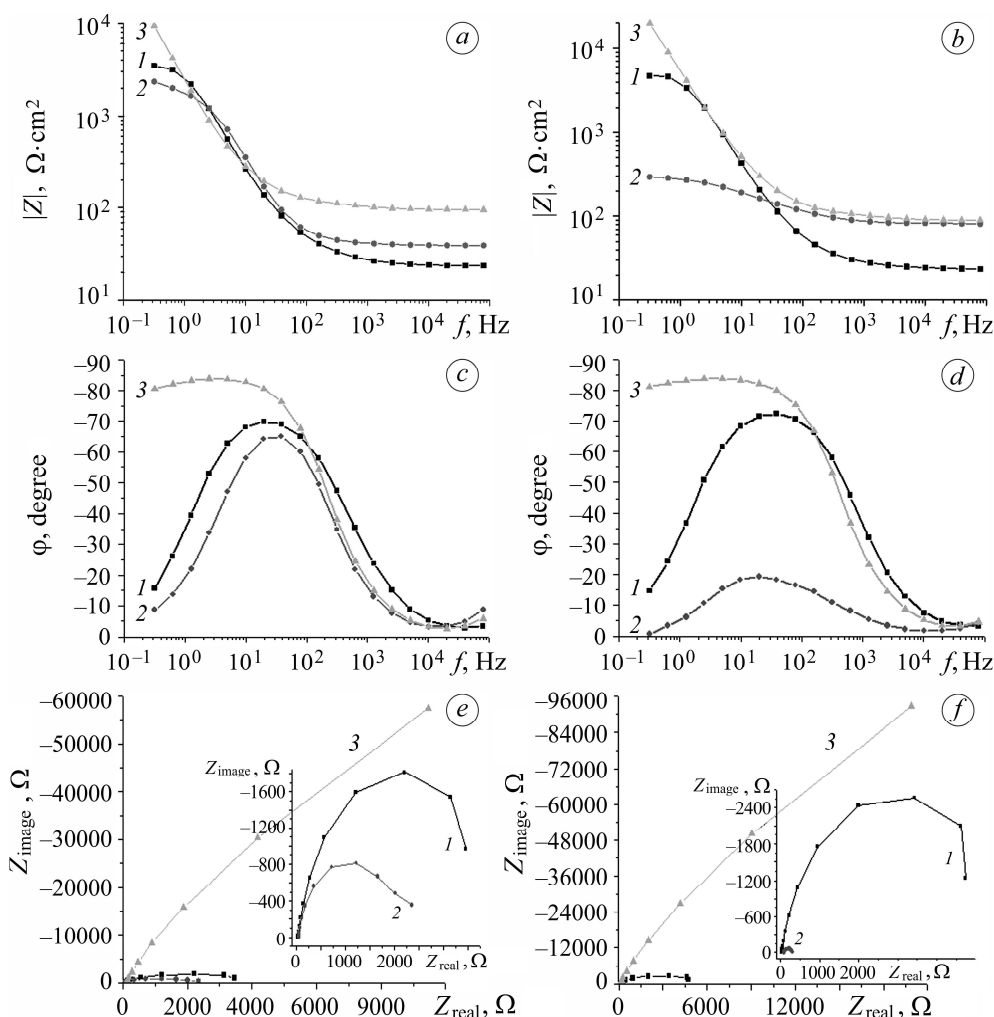


Рис. 2. Залежність модуля імпедансу (a, b), фазового кута (c, d) від частоти струму та криві Найквіста (e, f) у 0,5 М водних розчинах NaCl (1), HCl (2) та KOH (3) контактної (a, c, e) та зовнішньої (b, d, f) поверхонь АМС $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, $T = (293 \pm 1) \text{ K}$.

Fig. 2. Dependence of the impedance modulus (a, b) and phase angle (c, d) on the current frequency and the Nyquist curves (e, f) in a 0.5 M aqueous solution of NaCl (1), HCl (2) and KOH (3) of the contact (a, c, e) and external (b, d, f) surfaces of amorphous metallic alloys $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, $T = (293 \pm 1) \text{ K}$.

Всі спектри описують опір поверхневих плівок за частот нижче 100 Hz. Очевидно, що йони Cl^- в електроліті знижують тривкість поверхневих шарів, оскільки в розчинах NaCl та HCl значення модуля імпедансу $|Z|$ коливається від 2 до

$3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ для контактної поверхні при 20 мHz, тоді як у розчині KOH перевищує у 10 разів. Значення $|Z|$ для зовнішньої поверхні сплаву $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ у розчині HCl значно нижче, що, очевидно, зумовлено відмінністю елементного складу поверхневих плівок зовнішньої та контактної поверхонь. Для контактної фазовий кут (φ) досягає лише -20° , що свідчить про агресивність розчину HCl і швидке розчинення поверхні.

Таблиця 4. Результати ЕІС вимірювань АМС у різних агресивних середовищах

Середовище	Поверхня	$\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$			$\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$			$\text{Fe}_{59}\text{Ni}_{26}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_3\text{B}_{2,9}$		
		R_s, Ω	$R_{ct}, \Omega \cdot \text{cm}^2$	$C_{dl} \cdot 10^4, \text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$	R_s, Ω	$R_{ct}, \Omega \cdot \text{cm}^2$	$C_{dl} \cdot 10^4, \text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$	R_s, Ω	$R_{ct}, \Omega \cdot \text{cm}^2$	$C_{dl} \cdot 10^4, \text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$
0,5 М NaCl	к	13,15	1083	2,27	23,90	3432	0,20	13,67	38515	0,19
	з	15,07	378	1,03	23,74	4893	0,14	13,90	250830	0,08
0,5 М HCl	к	20,61	490	0,87	39,39	1861	0,20	12,32	4591	0,75
	з	23,34	385	0,96	81,38	249	0,19	14,16	24270	0,36
0,5 М KOH	к	49,75	86030	0,17	98,50	835970	0,76	12,90	18668	0,62
	з	63,53	47960	0,14	92,08	883220	0,88	12,74	22437	0,73

Найбільші значення опорів поверхневих шарів досліджуваних АМС виявили у лужному розчині. Змодельовані у комп'ютерній програмі великі значення R_{ct} відтворюють загальну тенденцію формування на поверхні сплавів захисних шарів із нерозчинних сполук, внаслідок взаємодії компонентів сплавів із лугом. Розташування піків фазового кута на графіках Боде також свідчить про виникнення захисних плівок. У водних розчинах натрій хлориду та хлоридної кислоти вищим опором володіє сплав $\text{Fe}_{59}\text{Ni}_{26}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_3\text{B}_{2,9}$. Ці результати узгоджуються з отриманими методом циклічної вольтамперометрії. Найтривкішими у лужному розчині є сплави $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ та $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$.

ВИСНОВКИ

Корозійну тривкість стрічкових аморфних сплавів на основі заліза визначає природа металевих компонентів та агресивне середовище, а також умови формування поверхні. Електрохімічні дослідження сплавів у розчинах натрій хлориду, калій гідроксиду та хлоридної кислоти засвідчили, що під час виникнення пасивувальної плівки у сильних окиснювальних середовищах активно розчиняються ті елементи сплаву, які не беруть участі у цьому процесі, а основні плівкотвірні, навпаки, не розчиняються, а нагромаджуються під плівкою і посилюють її захисну роль. Отже, йони Cl^- (особливо за низьких рН) під час тривалої дії є помітно агресивнішими окисниками порівняно з OH^- -йонами. Корозійно тривкіший у досліджуваних умовах багатокомпонентний сплав $\text{Fe}_{51,7}\text{Ni}_{21,7}\text{Cr}_{6,2}\text{Mo}_{0,6}\text{V}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_{13,1}$, що проявляється у додатніших значеннях потенціалу корозії, нижчих значеннях струмів корозії та більших значеннях опору поверхневих шарів.

Результати досліджень отримано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України в межах проекту “Нанокристалізація аморфних сплавів на основі кобальту: кінетика, властивості, застосування” (№ держреєстрації 0123U101830), а також частково фонду Simons Foundation (Award Number 1037973).

1. *Nizameiev M., Hertsyk O., and Boichyshyn L.* Physicochemical properties of amorphous and nanocrystalline alloys: Structure, physical-mechanical and corrosion properties of amorphous and nanocrystalline iron-based alloys. – LAP Lambert Acad. Publ., 2022. – 292 p.
2. *Corrosion resistance of pseudo-high entropy Fe-containing amorphous alloys in chloride-rich media / G. Y. Koga, D. Travessa, G. Zepon, D. D. Coimbra, A. M. Jorge, J. E. Berger, V. Roche, J.-C. Lepretre, C. Bolfarini, C. S. Kiminami, F. Wang, S. L. Zhu, A. Inoue, and W. J. Botta // J. Alloys and Comp. – 2021. – **884**, № 5. – Article number: 161090. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161090> Get rights and content*
3. *Nanoobjects & Nanostructuring. / Eds.: L. M. Boichyshyn, O. V. Reshetnyak. – Mississauga, Ontario: Nova Printing Inc., 2022. – Vol. I. – 160 p.*
4. *Improved corrosion resistance of novel Fe-based amorphous alloys / Jiawei Li, Lijing Yang, Haoran Ma, Kemin Jiang, Chuntao Chang, Chuntao Chang, Jun-Qiang Wang, Zhenlun Song, Xinmin Wang, and Run-Wei Li // Mater. & Design. – 2016. – **95**, № 5. – P. 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.100>*
5. *Corrosion resistance of Co₇₇Si₁₁B₁₂ amorphous metal alloys for the electrodes of hydrogen release from alkaline solutions / M. M. Lopachak, K. I. Khrushchuk, V. V. Dnistryan, L. M. Boichyshyn, and O. V. Reshetnyak // Materials Science. – 2021. – **56**, № 5. – P. 673–677. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00481-x>*
6. *Souza C. A. C., Ribeiro D. V., and Kiminami C. S.* Corrosion resistance of Fe–Cr-based amorphous alloys: An overview // *J. Non-Crystal. Solids.* – 2016. – **442**. – P. 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.009>
7. *Improved corrosion resistance of new Fe-based amorphous alloys / Xiang Li, Xu Zhao, Fang Lv, Fang Liu, and Yuxin Wang // Intern. J. Modern Phys. B. – 2017. – **31**, № 16–19. Article number: 1744010. <https://doi.org/10.1142/S0217979217440106>*
8. *Corrosion resistance of modified amorphous alloys based on iron in sulfuric acid / O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, T. H. Hula, S. A. Korniy, O. A. Yezerska, and N. L. Pandiak // Materials Science. – 2021. – **56**, № 6. – P. 755–763. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00492-8>*
9. *New Fe-based soft magnetic amorphous alloys with high saturation magnetization and good corrosion resistance for dust core application / Y. Han, F. L. Kong, F. F. Han, A. Inoue, S. L. Zhu, El-S. Shalaan, and F. Al-Marzouki // Intermetallics. – 2016. – **76**. – P. 18–25. DOI:10.1016/j.intermet.2016.05.011*
10. *Electrochemical properties of ternary amorphous alloys based on iron and cobalt in alkali solutions / L. M. Boichyshyn, O. M. Hertsyk, M. M. Lopachak, M. O. Kovbuz, T. G. Hula, and N. L. Pandiak // Materials Science. – 2020. – **55**, № 5. – P. 703–709. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00361-w>*
11. *Khrushchuk K., Boichyshyn L., and Kordan V.* Influence of annealing on mechanical properties of alloys of Al–REM–Ni(Fe) // *Mater. Today: Proc.* – 2022. – **62**. – P. 5739–5744. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.343>
12. *Corrosion resistance improvement of 45 steel by Fe-based amorphous coating / Guokun Huang, Lidan Qu, Yunzhuo Lu, Yongzhe Wang, Hongge Li, Zuoxiang Qin, and Xing Lu // Vacuum. – 2018. – **153**. – P. 39–42. DOI:10.1016/j.vacuum.2018.03.042*
13. *Hennayaka H. M., Lee H. S., and Yi S.* Surface oxidation of the Fe based amorphous ribbon annealed at temperatures below the glass transition temperature // *J. Alloys Compd.* – 2015. – **618**. – P. 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.160>
14. *Explosive crystallisation of metal glasses based on Fe–B during pulsed laser heating. Experiment and modelling / O. V. Smolyakov, V. V. Girzhon, S. I. Mudry, and Y. S. Nykyruy // Arch. of Mater. Sci. and Engin. – 2023. – **119**, № 2. – P. 49–55. DOI: 10.5604/01.3001.0053.4740*
15. *Influence of heat treatment and variable magnetic fields on the chemical resistance of amorphous alloys based on iron / O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, T. H. Pereverzeva, A. K. Borysyuk, and L. M. Boichyshyn // Materials Science. – 2014. – **50**, № 3. – P. 454–460. <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9742-3>*
16. *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, and O. V. Reshetnyak // Materials Science. – 2017. – **53**, № 3. – P. 330–336. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0079-6>*

Одержано 01.05.2023