

PACS numbers: 61.43.Dg, 62.20.Qp, 72.15.Jf, 81.40.Np, 81.65.Kn, 82.45.Bb, 82.80.Fk

## **Вплив низькотемпературного оброблення на стабільність фізико-хімічних властивостей аморфних стопів на основі феруму**

Т. Г. Переверзева, О. М. Герцик, М. О. Ковбуз, Л. М. Бойчишин,  
Р. Я. Серкіз, Ю. О. Кулик

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Кирила і Мефодія, 6,  
79005 Львів, Україна*

Досліджено залежність електрохімічних, магнетних, структурних та механічних параметрів аморфних металевих стопів (АМС) на основі феруму від 0,5–3,0 годин низькотемпературного оброблення в середовищі рідкого азоту. Низькотемпературне оброблення змінює структуру поверхневого шару стопів, що чітко реєструється електрохімічними методами в процесі взаємодії з 0,5 М водним розчином NaCl. Об'ємні характеристики, такі як магнетні, структурні та мікротвердість, практично не змінюються.

Dependences of electrochemical, magnetic, structural, and mechanical parameters of amorphous metallic alloys (AMA) based on iron on the 0.5–3.0 h low-temperature treatment in liquid-nitrogen environment are investigated. Low-temperature treatment changes the structure of surface layers of alloys that is testified by electrochemical methods in the process of interaction with 0.5 M aqueous solution of NaCl. The bulk microhardness and magnetic and structural characteristics are not practically changed.

Исследована зависимость электрохимических, магнитных, структурных и механических параметров аморфных металлических сплавов (АМС) на основе железа от 0,5–3,0 часов низкотемпературной обработки в среде жидкого азота. Низкотемпературная обработка изменяет структуру поверхностного слоя сплавов, что регистрируется электрохимическими методами в процессе взаимодействия с 0,5 М водным раствором NaCl. Объёмные характеристики, такие как магнитные, структурные и микротвёрдость, практически не изменяются.

**Ключові слова:** аморфні стопи на основі феруму, низькотемпературне оброблення, мікротвердість, Рентгенів мікроаналіз, термомагнетограми.

*(Отримано 22 листопада 2013 р.)*

## 1. ВСТУП

Структурні зміни в аморфних металевих стопах (АМС) на основі Fe спричинені різними зовнішніми впливами, пов'язані з процесами релаксації і супроводжуються зняттям надлишкових напружень, а також зменшенням надлишкового вільного об'єму. При цьому були відмічені зміни фізико-хімічних властивостей АМС, особливо магнетом'яких характеристик [1, 2]. Отже, пошук оптимальних режимів температурного оброблення і їх температурно-часових характеристик для досягнення заданих фізико-хімічних властивостей зразків, дає можливість підвищити термічну і корозійну стабільність АМС, а також їх магнетні властивості.

Фізико-хімічні параметри аморфних стопів на основі заліза добре відомі [3, 4], що і визначило їх різноманітне застосування як магнетних екранів, трансформаторів, різальних інструментів, електродів. Враховуючи експлуатацію даного стопу в складних температурних умовах, ми дослідили залежність його структурних і електрохімічних параметрів від низькотемпературної оброблення.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Одержано результати досліджень електрохімічних, структурних, механічних і магнетних властивостей аморфних стопів зі складами  $\text{Fe}_{59,0}\text{Ni}_{26,0}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_{3,0}\text{B}_{2,9}$  (АМС-1),  $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$  (АМС-2),  $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$  (АМС-3) на основі заліза, одержаних у вигляді стрічки шириною  $\approx 2$  см і товщиною біля 20 мкм методом спінінгування розтопу в Інституті металофізики НАН України (м. Київ). Внаслідок способу охолодження розтопу розрізняють контактний (к) та зовнішній (з) боки стрічки.

Низькотемпературне оброблення зразків виконували в рідкому азоті  $\text{N}_2$  ( $T = 77$  К) тривалістю 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 годин.

Мікроскопічні дослідження елементного складу поверхні виконували за допомогою сканівної електронної мікроскопії та Рентгенового мікроаналізу на базі електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-102-02 [5]. Одержані результати є усередненими з 5 вимірів у різних точках поверхні. Відхилення окремих вимірів дозволяє усереднення з похибкою  $\Delta g = \pm 0,04$ .

Взаємодію поверхні стопів з агресивним середовищем, яким виступив 0,5 М водний розчин NaCl, досліджували методом хронопотенціометрії та циклічної вольтамперометрії за допомогою потенціостату Jaisssle Potentiostat-Halvanostat IMR 88 PCR. Для контролю швидкості встановлення кінцевого значення вільного потенціалу ( $E_k$ ) робочого електрода — пластинки стопу, як електрод порівняння використовували срібнохлоридний електрод ( $E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}$ ). Вільний потенціал поверхні  $E_k$  встановлюється з часом, тому вимірювання

ерс гальванічного елемента виконували протягом 20 хвилин. Поляризаційні виміри одержані методом циклічної вольтамперометрії (ЦВА) в потенціодинамічному режимі із швидкістю розгортки потенціалу 20 мВ/с за триелектродною схемою: АМС-електрод —  $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}_{\text{нас}}$  та допоміжний електрод — Pt-пластинка [6].

Мікротвердість зразків, яких попередньо піддали охолодженню, вимірювалася на приладі ПМТ-3 при навантаженні у 165 г [7].

Термомагнетограми знімали з використанням вібраційного магнетометра, який реєструє граничну намагнетованість насичення ( $\sigma$ ) в інтервалі температур 77–1000 К при напруженості магнетного поля 800 кА/м, що відповідає умовам магнетного фазового аналізу [2].

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За допомогою електронного Рентгенового мікроаналізу встановлено елементний склад АМС до і після піддавання їх зовнішнім навантаженням (табл. 1). У випадку багатокомпонентного стопу АМС-1 після охолодження до температури рідкого азоту і відігрівання до кімнатної температури спостерігається збільшення вмісту основного компонента — заліза на поверхні стопу, а також збільшення вмісту таких елементів як Ni, Cr, W. Охолодження стопу супроводжується дисоціативною адсорбцією води із залишкової атмосфери з формуванням поверхневих гідроксидів [8]. Вміст металічних елементів на поверхні стопу, що містить Cu та Nb (АМС-3), також зростає, тоді як поверхня стопу легованого Ni та Mo (АМС-2), навпаки, збіднюється на металічні елементи.

За результатами хронопотенціометрії АМС-1, що має склад  $\text{Fe}_{59,0}\text{Ni}_{26,0}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_{3,0}\text{B}_{2,9}$ , у 0,5 М водному розчині NaCl (табл. 2) попереднє витримування зразків 0,5 та 1,0 год в середовищі рідкого азоту при  $T = 77 \text{ К}$  призводить до суттєвого зсуву  $\cong 0,22\text{--}0,33 \text{ В}$  значень потенціалів в анодний бік, тобто відбувається покращення протикорозійної тривкості. Більш чутливим до тривалої експозиції при низькій температурі виявився контактний бік.

**ТАБЛИЦЯ 1.** Елементний склад АМС (ат.%) до і після охолодження при  $T = 77 \text{ К}$  протягом 3 год.

Елемент	Fe	Ni	Mo	Cr	V	W	Cu	Nb
АМС-1	56,4	29,6	0,57	7,15	1,94	1,69	—	—
АМС-1 ( $T = 77 \text{ К}$ )	58,3	29,7	0,00	7,53	2,12	0,14	—	—
АМС-2	92,95	1,30	1,49	—	—	—	—	—
АМС-2 ( $T = 77 \text{ К}$ )	92,87	1,1	1,2	—	—	—	—	—
АМС-3	84,41	—	—	—	—	—	1,47	7,03
АМС-3 ( $T = 77 \text{ К}$ )	86,45	—	—	—	—	—	1,74	7,11

**ТАБЛИЦЯ 2.** Результати хронопотенціометричного дослідження корозії в 0,5 М водному розчині NaCl досліджуваних АМС 1–3, попередньо підданих охолодженню при  $T = 77$  К.

Тривалість охолодження	Бік	$-E_0$ , В	$-E_k$ , В	$\Delta E$ , В	$v_{60} \cdot 10^4$ , В/с
<b>Fe<sub>59,0</sub>Ni<sub>26,0</sub>Cr<sub>6,6</sub>Mo<sub>0,9</sub>V<sub>1,6</sub>W<sub>0,3</sub>Si<sub>3,0</sub>B<sub>2,9</sub></b>					
—	к	0,35	0,47	0,12	7,6
	з	0,28	0,37	0,09	4,9
0,5 год	к	0,09	0,15	0,06	6,7
	з	0,06	0,14	0,08	2,3
1,0 год	к	0,01	0,13	0,12	3,8
	з	0,08	0,15	0,07	8,3
<b>Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub></b>					
—	к	0,52	0,60	0,08	3,3
	з	0,51	0,65	0,14	3,2
0,5 год	к	0,46	0,60	0,14	1,6
	з	0,48	0,64	0,16	3,3
1,0 год	к	0,51	0,62	0,11	5,0
	з	0,49	0,65	0,16	1,6
3,0 год	к	0,60	0,66	0,06	1,8
	з	0,55	0,66	0,11	3,0
<b>Fe<sub>73,1</sub>Cu<sub>1,0</sub>Nb<sub>3,0</sub>Si<sub>15,5</sub>B<sub>7,4</sub></b>					
—	к	0,20	0,40	0,20	7,1
	з	0,23	0,38	0,15	3,8
0,5 год	к	0,29	0,42	0,13	6,1
	з	0,26	0,40	0,14	6,0
1,0 год	к	0,34	0,44	0,10	4,1
	з	0,30	0,40	0,10	4,6
3,0 год	к	0,21	0,41	0,20	8,3
	з	0,20	0,40	0,20	7,5

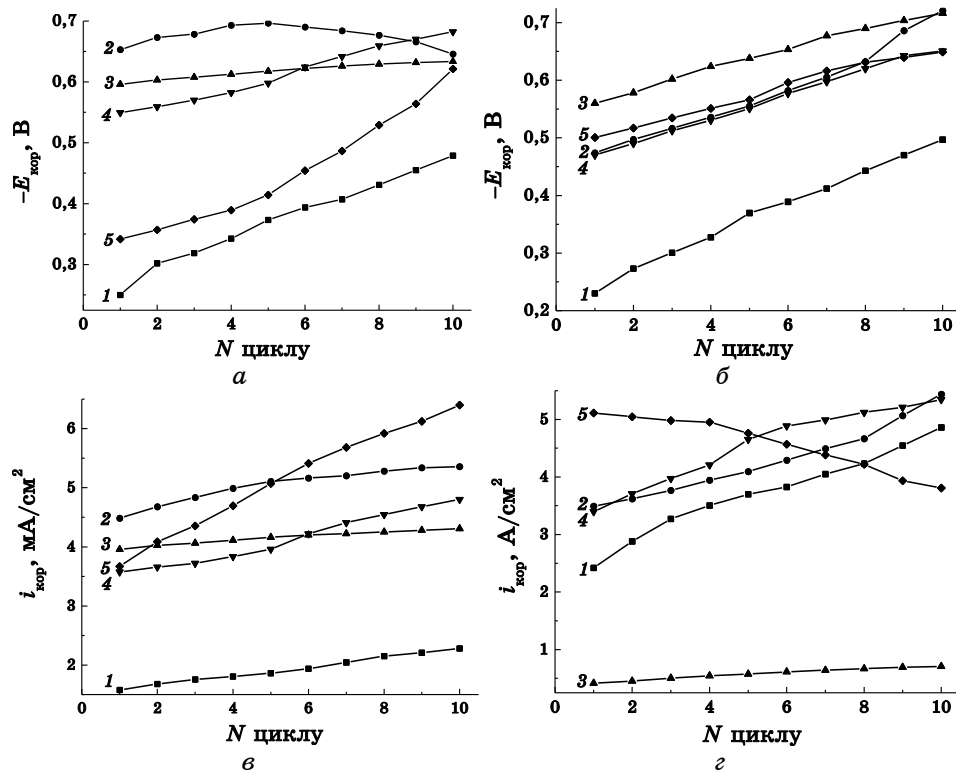
Як відомо [9] (табл. 1), під впливом термообробки змінюється елементний склад поверхні аморфних стопів, і ці зміни чітко реєструються хронопотенціометрично (табл. 2). Внаслідок 2 і 3 годинного охолодження зразків АМС-2 Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub> до 77 К їх контактна поверхня виявилась електрохімічно більш активною ніж зовнішня, яка внаслідок технології одержання стрічки АМС твердіє на частки секунди (на якусь мить) пізніше і уже містить нанокристалічну фазу з оксидним шаром, що підвищує її стабільність.

Аналогічні хронопотенціометричні дослідження впливу попереднього охолодження АМС-3 Fe<sub>73,1</sub>Cu<sub>1,0</sub>Nb<sub>3,0</sub>Si<sub>15,5</sub>B<sub>7,4</sub> на електрохіміч-

ні характеристики в 0,5 М водному розчині NaCl показали, що така термообробка призводить до незначної активації поверхні, потенціал при цьому зсувається на  $\approx 0,05$  В у катодний бік. Більші зміни потенціалу спостерігаються для контактного боку стрічки.

Необхідно відмітити, що, не зважаючи на виявлені особливості, коливання вільного потенціалу в межах  $\approx 0,05-0,15$  В підтверджують високу стабільність аморфних стопів  $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$  та  $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$  до низькотемпературного оброблення.

За результатами оцінки стійкості АМС-1, що має склад  $\text{Fe}_{59,0}\text{Ni}_{26,0}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_{3,0}\text{B}_{2,9}$ , у 0,5 М водному розчині NaCl методом циклічної вольтамперометрії в умовах примусового сканування потенціалу в інтервалі  $(-1,5+0,5)$  В простежується зниження протикорозійної тривкості зразків, що зумовлює зсув потенціалів корозії в катодний бік та збільшення струмів корозії (рис. 1, а, б, в, г).



**Рис. 1.** Зміна потенціалів корозії  $E_{\text{кор}}$  (а, б) та струмів корозії  $i_{\text{кор}}$  (в, г) в 0,5 М водному розчині NaCl контактного (а, в) та зовнішнього (б, г) боків стрічки АМС-1  $\text{Fe}_{59,0}\text{Ni}_{26,0}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_{3,0}\text{B}_{2,9}$ , вихідного (1) та підданого охолодженню 0,5 год (2), 1 год (3), 2 год (4) та 3 год (5) при  $T = 77$  К.

**ТАБЛИЦЯ 3.** Електрохімічні параметри корозії стрічки АМС-2 Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub>, вихідного та підданого охолодженню при T = 77 К (1, 5, 10 — номер циклу), у 0,5 М водному розчині NaCl.

Цикл	Вік	Тривалість охолодження													
		0,5 год				1 год				2 год				3 год	
		-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	-E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> · 10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>
1	к	0,92	1,04	0,65	1,86	0,76	1,87	0,93	3,23	0,75	3,27				
	з	0,94	0,88	1,01	0,62	0,89	1,21	0,84	1,01	0,91	3,63				
5	к	0,93	4,32	0,86	13,13	0,70	4,18	0,99	8,71	0,77	9,74				
	з	0,91	1,24	0,98	12,79	0,96	3,80	0,95	5,98	0,96	10,23				
10	к	0,97	2,86	0,75	8,25	0,74	5,44	0,98	10,87	0,91	7,98				
	з	0,91	1,24	0,98	12,79	0,96	3,80	0,95	5,98	0,96	10,23				

**ТАБЛИЦЯ 4.** Мікротвердість зразків аморфних стопів на основі Fe, підданих охолодженню при T = 77 К.

АМС	Тривалість охолодження									
	—		0,5 год		1 год		2 год		3 год	
	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	H · 10 <sup>9</sup> , Па	
Fe <sub>78,5</sub> Ni <sub>1,0</sub> Mo <sub>0,5</sub> Si <sub>6,0</sub> B <sub>14,0</sub>	10,03	11,70	11,47	11,65	11,30					
Fe <sub>73,1</sub> Cu <sub>1,0</sub> Nb <sub>3,0</sub> Si <sub>15,5</sub> B <sub>7,4</sub>	12,96	14,87	17,39	14,36	12,83					

Попереднє охолодження АМС-2  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  протягом 1 та 2 годин, очевидно, зумовлює пасивацію поверхні, що призводить до підвищення її протикорозійної тривкості навіть при додатковому накладанні потенціалу, про це свідчать потенціали корозії, які зсуваються в анодний бік (табл. 3). Однак, утворені поверхневі шари не є стійкими при тривалому контакті з агресивним середовищем і з часом спостерігається зсув значень потенціалів корозії до більш від'ємних. Перемінне (нестабільна) змінення зовнішнього потенціалу в агресивному середовищі є нищівним для захисних оксидно-гідроксидних поверхневих шарів. Необхідно відмітити, що внаслідок збільшення тривалості охолодження зразків електрохімічні параметри корозії змінюються не прямо пропорційно.

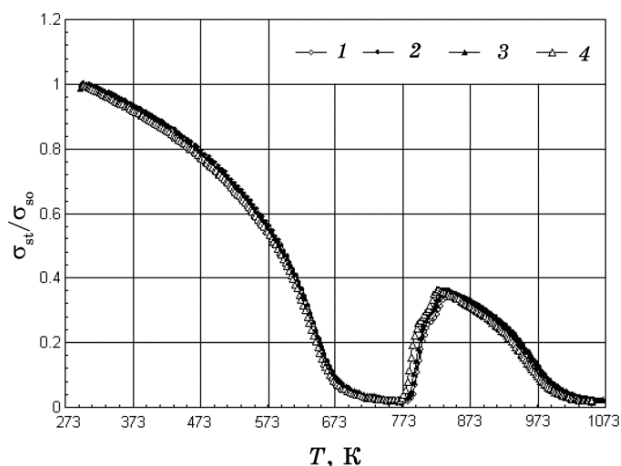
Оцінка мікротвердості зразків, які знаходились під впливом низьких температур показала, що охолодження АМС-2 зі складом  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  при  $T = 77$  К призводить до підвищення мікротвердості зразків (табл. 4). Для АМС-3  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$  зміна мікротвердості має нелінійний характер. Одержані значення мікротвердості свідчать про високу механічну стійкість стопів, яка не піддається впливові низькотемпературного оброблення (табл. 4), а також відсутні при цьому істотні зміни структури [10] (табл. 5).

Вимірювання магнетних властивостей охолоджених зразків АМС-2  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  підтверджує їх стійкість до низькотемпературного оброблення (рис. 2).

Наявність мікроскопічних областей, розміри яких вимірюються нанометрами, а також ймовірність утворення проміжного стану та-

**ТАБЛИЦЯ 5.** Структурні характеристики аморфних стопів на основі Fe до і після тригодинного охолодження при  $T = 77$  К.

$T, K$	$a(S)$		$\Delta a(S)$	
	273	77		
$Fe_{59,0}Ni_{26,0}Cr_{6,6}Mo_{0,9}V_{1,6}W_{0,3}Si_{3,0}B_{2,9}$				
$a(S_1)$	3,799	3,731	$\Delta a(S_1)$	-0,068
$a(S_2)$	1,657	1,683	$\Delta a(S_2)$	+0,026
$a(S_3)$	1,222	1,318	$\Delta a(S_3)$	+0,096
$Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$				
$a(S_1)$	3,618	3,673	$\Delta a(S_1)$	+0,055
$a(S_2)$	1,524	1,491	$\Delta a(S_2)$	-0,033
$a(S_3)$	1,052	1,019	$\Delta a(S_3)$	-0,033
$Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$				
$a(S_1)$	3,895	3,700	$\Delta a(S_1)$	-0,195
$a(S_2)$	1,530	1,573	$\Delta a(S_2)$	+0,043
$a(S_3)$	1,172	1,208	$\Delta a(S_3)$	+0,036



**Рис. 2.** Термомагнетограми ( $H = 800$  кА/м) вихідного (1) АМС-2 зі складом  $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$  та попередньо витриманих 0,5 год (2), 2 год (3) та 3 год (4) зразків при  $T = 77$  К.

кого ж розміру при зміні температури уможливають локалізувати процеси намагнетування в мікроскопічних областях незалежно від навколишньої магнетної матриці [11]. Через такі особливості аморфного стопу його магнетна сприйнятливність стабілізується.

#### 4. ВИСНОВКИ

Згідно з результатами хронопотенціометричного дослідження впливу охолодження АМС-1  $\text{Fe}_{59,0}\text{Ni}_{26,0}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{0,9}\text{V}_{1,6}\text{W}_{0,3}\text{Si}_{3,0}\text{B}_{2,9}$  при  $T = 77$  К на його протикорозійну тривкість в 0,5 М водному розчині NaCl поверхня зразків стопу пасивується, що виявляється в зсуві значень потенціалів у анодний бік. Для стопів зі складами  $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$  та  $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$  дія низькотемпературного оброблення незначною мірою активує поверхню, про що свідчать від'ємні значення потенціалів в агресивному середовищі NaCl. В умовах вольтамперометрії внаслідок дії зовнішнього потенціалу на досліджувані стопи їх протикорозійна тривкість в 0,5 М NaCl знижується. Отже, можна стверджувати, що низькотемпературне оброблення змінює структуру поверхневого шару стопів, що чітко реєструється електрохімічними методами в процесі взаємодії з агресивним середовищем.

Об'ємні характеристики, такі як магнетні, структурні та мікротвердість практично не змінюються. Тобто після охолодження при  $T = 77$  К тривалістю 0,5–3 год змін внутрішньої структури досліджуваних аморфних стопів не виявлено.



## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. П. Брехаря, В. В. Гиржон, А. В. Смоляков, В. В. Немошкаленко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **19**, № 12: 69 (1997).
2. О. М. Герцик, М. О. Ковбуз, Л. М. Бойчишин, А. К. Борисюк, Ю. О. Кулик, Б. Я. Котур, *Металлофиз. новейшие технол.*, **34**, № 5: 643 (2012).
3. А. И. Манохин, Б. С. Митин, В. А. Васильев, *Аморфные сплавы* (Москва: Металлургия: 1984).
4. G. Kumar, H. Tang, and J. Schroers, *Nature*, **457**: 868 (2009).
5. О. Я. Тузяк, В. Ю. Курляк, *Основи електронної та зондової мікроскопії* (Львів: Вид. ЛНУ ім. Івана Франка: 2012).
6. L. M. Boichyshyn, O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, T. H. Pereverzeva, and B. Ya. Kotur, *Materials Science*, **48**, No. 4: 555 (2013).
7. Л. Бойчишин, М. Ковбуз, О. Герцик, В. Носенко, Б. Котур, *Физ. тверд. тела*, **55**, № 2: 209 (2013).
8. Г. Г. Галстян, *Структурно-композиційні ефекти, індуковані зовнішніми діями в поверхневих шарах магнітом'яких аморфних сплавів* (автореф. дис. канд. фіз.-мат. наук) (Київ: Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України: 2010).
9. Г. Е. Абросимова, А. С. Аронин, *Физ. тверд. тела*, **32**, № 6: 1742 (1990).
10. Л. Бурина, Ю. Качан, *ЖЭТФ*, **106**, № 2: 633 (1994).
11. С. Г. Зайченко, Н. И. Захаренко, А. М. Глезер, Н. С. Перов, *Вестник Московского ун-та. Серия 3: Физика. Астрономия*, № 5: 44 (2006).

## REFERENCES

1. G. P. Brekharya, V. V. Girzhon, A. V. Smolyakov, and V. V. Nemoshkalenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **19**, No. 12: 69 (1997) (in Russian).
2. O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, L. M. Boichyshyn, A. K. Borisjuk, Yu. O. Kulyk, and B. Ya. Kotur, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **34**, No. 5: 643 (2012) (in Russian).
3. A. I. Manokhin, B. S. Mitin, and V. A. Vasil'ev, *Amorfnyye Splavy* (Moscow: Metallurgiya: 1984) (in Russian).
4. G. Kumar, H. Tang, and J. Schroers, *Nature*, **457**: 868 (2009).
5. O. Ya. Tuzyak and V. Yu. Kurljak, *Osnovy Ehlektronnoyi ta Zondovoyi Mikroskopii* (Lviv: Vyd. LNU im. Ivana Franka: 2012) (in Ukrainian).
6. L. M. Boichyshyn, O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, T. H. Pereverzeva, and B. Ya. Kotur, *Materials Science*, **48**, No. 4: 555 (2013).
7. L. Boichyshyn, M. Kovbuz, O. Hertsyk, V. Nosenko, and B. Kotur, *Fiz. Tverd. Tela*, **55**, No. 2: 209 (2013) (in Russian).
8. G. G. Galstyan, *Strukturno-Kompozitsiyani Efekty, Indukovani Zovnishnimy Diyamy v Poverkhnevyykh Sharakh Magnitom'yakykh Amorfnykh Splaviv* (Avtoref. Dis. Cand. Fiz.-Mat. Sci.) (Kyiv: G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine: 2010) (in Ukrainian).
9. G. E. Abrosimova and A. S. Aronin, *Fiz. Tverd. Tela*, **32**, No. 6: 1742 (1990).
10. L. Burina and Yu. Kachan, *ZhETF*, **106**, No. 2: 633 (1994) (in Russian).
11. S. G. Zaichenko, N. I. Zakharenko, A. M. Glezer, and N. S. Perov, *Vestnik Moskovskogo Un-ta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*, No. 5: 44 (2006) (in Russian).