

AMORPHOUS AND LIQUID STATES

PACS numbers: 61.43.Dg, 75.50.Kj, 81.65.Rv, 82.45.Bb, 82.80.Fk

Електрохімічні характеристики модифікованих аморфних стопів у нітратній кислоті

О. М. Герцик, Т. Г. Гула, М. О. Ковбуз, Н. Л. Пандяк*

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська, 1,
79000 Львів, Україна*
**Національний лісотехнічний університет України,
вул. Генерала Чупринки, 103,
79057 Львів, Україна*

Методами хронопотенціометрії та циклічної вольтамперометрії оцінено корозійну тривкість стрічкових аморфних стопів у водних розчинах 0,05 та 0,1 М нітратної кислоти. Показано підвищення корозійної тривкості зразків у розчині з більшою концентрацією. З'ясовано, що після магнетної обробки елементний склад та морфологія поверхні стопів суттєво змінюються. Збільшення тривалості перебування зразків у змінному магнетному полі та зростання швидкості розгортки потенціалу сприяють пасивації досліджуваних стопів.

Ключові слова: аморфні стопи, змінне магнетне поле, електрохімічні характеристики, нітратна кислота.

The corrosion resistance of the ribbon amorphous alloys in an aqueous solution of 0.05 and 0.1 M nitric acid is investigated by chronopotentiometry and cyclic voltammetry methods. Better corrosion resistance of samples in a solution with a higher concentration is shown. As found, after magnetic treatment the elemental composition and surface morphology of alloys change

Corresponding author: Tetyana Heorhiyivna Hula
E-mail: djunjer1@gmail.com

*Ivan Franko National University of Lviv,
1 Universytets'ka Str., UA-79000 Lviv, Ukraine*
**Ukrainian National Forestry University,
103 Heneral Chuprynka Str., UA-79057 Lviv, Ukraine*

Citation: O. M. Hertsyk, T. H. Hula, M. O. Kovbuz, and N. L. Pandiak, Electrochemical Characteristics of Modified Amorphous Alloys in Nitric Acid, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 4: 455–463 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.04.0455](https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0455).

significantly. An increasing of duration of magnetic influence on the samples by an alternating magnetic field and higher potential scanning rate cause to the passivation of the investigated alloys.

Key words: amorphous alloys, alternating magnetic field, electrochemical characteristics, nitric acid.

(Отримано 11 вересня 2020 р.; остаточн. варіант — 21 січня 2021 р.)

1. ВСТУП

Аморфні металеві стопи (АМС) є матеріалами спеціального призначення, фізико-хімічні властивості яких визначаються елементним складом та структурою [1–3]. Однак в умовах їхнього використання необхідно враховувати, що вони є термодинамічно нестабільними, тому продуктивна робота виробів з АМС вимагає збереження відповідних властивостей. Під дією різних зовнішніх чинників (термообробка, магнетні поля, опромінення, хімічні реагенти) властивості аморфних стопів змінюються. Тому такі фізичні та хімічні чинники можна використовувати для спрямованої модифікації АМС.

Модифікація аморфних стопів з використанням змінного магнетного поля (ЗМП), очевидно, зумовить зміну їхньої корозійної тривкості в різних агресивних середовищах, зокрема, в розчинах нітратної кислоти [4]. Змінне магнетне поле впливає не тільки на дифузю у твердих металевих матеріалах, але і на формування фаз в металевих стопах, що може зумовлювати зміну компонентного складу доменів [5]. Такі характеристики безпосередньо впливають на електрохімічну активність металевих матеріалів, тобто їхню корозійну тривкість.

Тому важливими є фізико-хімічні дослідження АМС $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$, $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ щодо впливу таких чинників, як елементний склад АМС, тривалість експозиції у змінному магнетному полі ЗМП та склад агресивного середовища. Крім того, важливою є оцінка впливу вище перерахованих чинників ще й за різних умов електрохімічних досліджень (зміна швидкості сканування потенціалу).

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Оцінювали корозійну тривкість контактної та зовнішньої поверхонь стрічок аморфних стопів $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ та $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, виготовлених в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України [6].

Модифікацію зразків АМС проводили змінним магнетним полем (430 мТл, 50 Гц), тривалість експозиції у ЗМП — 30 та 60 хв.

Дослідження вихідних та модифікованих зразків аморфних стопів у 0,05 та 0,1 М водних розчинах нітратної кислоти методами циклічної вольтамперометрії та потенціометрії 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). Вимірювання проводили за швидкості сканування потенціалу: 10, 20 та 50 мВ/с [7].

Мікроскопічні дослідження проводили на сканувальному (растровому) електронному мікроскопі JSM-6480 фірми JEOL, в якому зображення досліджуваного об'єкта формується під час сканування його поверхні точно сфокусованим (5–10 нм) пучком електронів. Енергодисперсійний мікроаналіз (ЕДМ) проводили за допомогою спектрометра Oxford INCAEnergy 51-ADD0098, який є приставкою до електронного мікроскопа JEOL 7000F [8].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Висока тривкість до корозії аморфних стопів на основі Fe зумовлена утворенням на їхній поверхні пасивувальних плівок, які мають високі захисні властивості, високий ступінь однорідності й швидкості утворення [9]. Збільшення концентрації нітратної кислоти приводить до сповільнення корозії таких стопів внаслідок їх пасивації. Тому оцінюючи корозійну тривкість аморфних стопів на основі Fe у розчинах нітратної кислоти, потрібно враховувати також її концент-

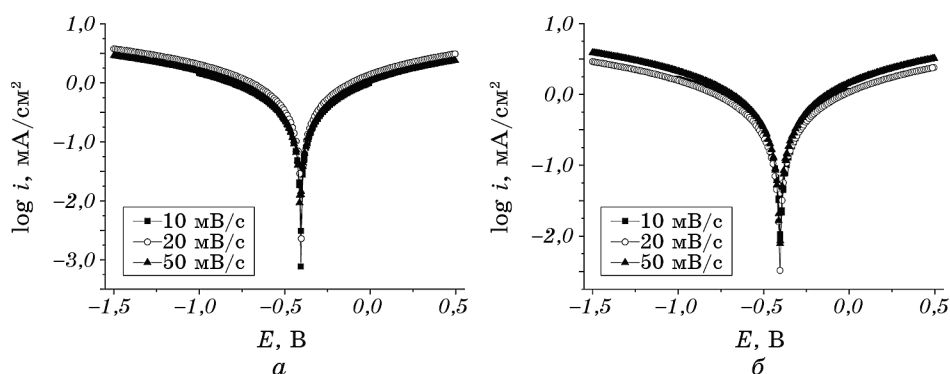


Рис. 1. Вольтамперограми (2-ий цикл) контактної (а) та зовнішньої (б) поверхонь стрічки аморфного стопу $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ у 0,05 М водному розчині HNO_3 за різних швидкостей розгортки потенціалу.

Fig. 1. Voltammograms (2nd cycle) of contact (a) and external (b) surfaces of amorphous $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ tape in 0.05 M aqueous HNO_3 solution at different potential scanning rates.

ТАБЛИЦЯ 1. Результати потенціометричного дослідження контактної та зовнішньої поверхонь стрічки аморфного ступу $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ у водних розчинах HNO_3 різної концентрації. Тут E_0 — початкове значення потенціалу АМС, E — значення потенціалу через 20 хвилин контакту з агресивним середовищем, $\Delta E = |E - E_0|$.

TABLE 1. The results of potentiometric investigation of the contact and external surfaces of the amorphous $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ tape in aqueous HNO_3 solutions with different concentrations. Here E_0 is the initial value of the AMA potential; E is the value of the potential after 20 minutes contact with aggressive environments, $\Delta E = |E - E_0|$.

Поверхня	$-E_0$, В	$-E$, В	ΔE , В	$v_{60} \cdot 10^5$, В/с
0,05 М водний розчин HNO_3				
контактна	0,38	0,39	0,01	5,0
зовнішня	0,38	0,40	0,02	1,7
0,1 М водний розчин HNO_3				
контактна	0,32	0,34	0,02	3,9
зовнішня	0,32	0,34	0,02	7,9

рацію та можливість взаємодії з усіма компонентами ступу [10–12].

Щоб оцінити вплив модифікації ЗМП на корозійну тривкість аморфних ступів $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ та $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ у водних розчинах нітратної кислоти, необхідно протестувати вихідні зразки в цьому агресивному середовищі за різних умов.

Потенціометричне дослідження корозійної тривкості вихідних зразків АМС $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ (табл. 1) у 0,05 та 0,1 М водному розчині HNO_3 показало, що як для контактної, так і зовнішньої поверхонь стрічки під час контакту з агресивним середовищем нітратної кислоти, незалежно від концентрації, значення потенціалів дещо зсуваються у катодний бік, тобто поверхня розчиняється. Однак зсув є незначним, а самі значення потенціалів АМС є значно додатнішими, ніж у стандартному 0,5 М розчині натрій хлориду [13].

У 0,05 М водному розчині HNO_3 більший зсув простежується у випадку зовнішньої поверхні. Чим вища концентрація нітратної кислоти, тим додатніше значення потенціалів поверхні, тобто вища корозійна тривкість.

Оцінка тривкості АМС $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ (рис. 1, табл. 2) у 0,05 М водному розчині HNO_3 методом циклічної вольтамперометрії в умовах примусового сканування потенціалу в інтервалі (–1,5 В — 0,5 В) за різних швидкостей розгортки потенціалу у випадку контактної та зовнішньої поверхонь стрічок показала, що значення потенціалів корозії в часі дещо зсуваються в катодну сторону. Однак простежується зсув потенціалів корозії в анодний бік у разі збільшення швидкості розгортки потенціалу. Більший вплив швидко-

сті розгортки потенціалу встановлено у випадку контактної поверхні щодо зовнішньої поверхні за вищих швидкостей розгортки (20 і 50 мВ/с) потенціали корозії, практично збігаються.

Дослідження корозійної тривкості зразків АМС у 0,1 М водному розчині нітратної кислоти за різних швидкостей розгортки потенціалу (табл. 2) показали, що в цілому у розчині вищої концентрації також простежується деякий зсув потенціалу корозії в анодну сторону та зниження значень струмів корозії, що вказує на пасивацію поверхні. Однак від швидкості розгортки значення потенціалу корозії змінюється несуттєво для обох поверхонь стрічки досліджуваного аморфного стопу.

Методом електронного рентгенівського мікроаналізу визначено елементний склад АМС до і після зовнішніх навантажень (табл. 3). У випадку АМС $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{B}_{6,0}\text{Si}_{14,0}$ і $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ модифікація змінним магнетним полем сприяє значному виходу на поверхню Fe та B, тобто утворюється сполука Fe_3B . У поверхневих шарах стопу $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, підданого намагнетчуванню,

ТАБЛИЦЯ 2. Електрохімічні параметри корозії стрічки аморфного металевого стопу $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ у водних розчинах HNO_3 різної концентрації.

TABLE 2. Electrochemical corrosion parameters of amorphous tape $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{6,0}\text{B}_{14,0}$ in HNO_3 aqueous solutions with different concentrations.

№ циклу	Поверхня	Швидкість сканування потенціалу, мВ/с					
		10		20		50	
		$E_{\text{кор.}}, \text{В}$	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^3, \text{А/см}^2$	$E_{\text{кор.}}, \text{В}$	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^3, \text{А/см}^2$	$E_{\text{кор.}}, \text{В}$	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^3, \text{А/см}^2$
0,05 М водний розчин HNO_3							
1	контактна	-0,40	2,1	-0,10	17,3	-0,29	3,9
	зовнішня	-0,39	12,8	-0,09	3,5	-0,10	3,5
5	контактна	-0,41	6,8	-0,12	0,9	-0,32	4,0
	зовнішня	-0,40	0,9	-0,10	7,7	-0,11	19,4
10	контактна	-0,43	5,5	-0,14	10,7	-0,31	1,8
	зовнішня	-0,39	7,9	-0,11	9,2	-0,11	8,8
0,1 М водний розчин HNO_3							
1	контактна	-0,35	5,3	-0,34	10,1	-0,34	4,0
	зовнішня	-0,34	2,4	-0,35	14,0	-0,33	4,3
5	контактна	-0,37	2,5	-0,35	0,5	-0,35	1,7
	зовнішня	-0,34	3,3	-0,35	5,0	-0,34	0,2
10	контактна	-0,33	1,3	-0,36	9,3	-0,33	0,6
	зовнішня	-0,37	12,2	-0,36	16,4	-0,35	7,3

ТАБЛИЦЯ 3. Елементний склад (ат.%) поверхні вихідних аморфних стовпів і після магнетної модифікації.**TABLE 3.** Elemental composition (at.%) of surface of the initial amorphous tape and after magnetic modification.

Тривалість модифікації ЗМП, хв	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
–	78,50	1,00	0,50	14,0	6,00	73,10	1,00	3,00	15,5	7,40
30	81,42	0,63	1,07	5,18	11,70	74,63	1,20	3,10	10,1	11,00

простежується підвищення ат.% Cu та Nb, які утворюють щільні оксидні шари і можуть підвищувати корозійну тривкість поверхні у агресивних середовищах. Більші зміни елементного складу поверхні простежуються у АМС Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0}.

Внаслідок модифікації аморфних стовпів на основі Fe змінним магнетним полем змінюється елементний склад поверхонь стрічок [14], що, очевидно, зумовить зміну їхньої корозійної тривкості у розчинах нітратної кислоти. Електрохімічні дослідження модифікованих зразків аморфного стовпу Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0} за досліджуваних швидкостей розгортки потенціалу показали (рис. 2), що за нижчих швидкостей розгортки потенціалу (10 мВ/с) у випадку

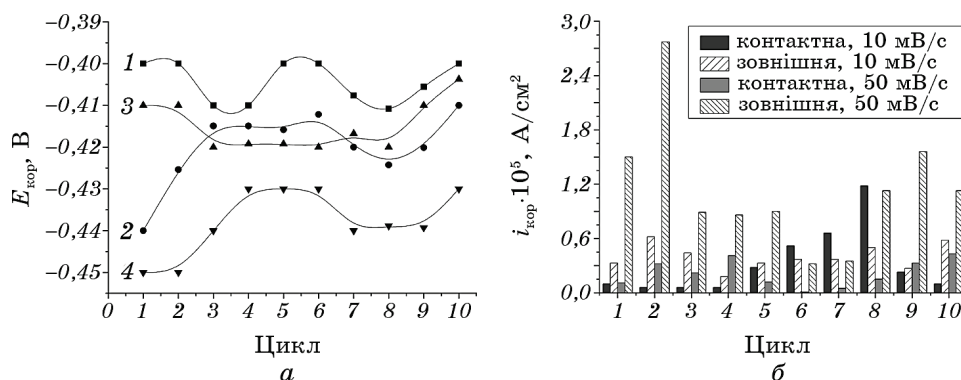


Рис. 2. Зміна потенціалів (а) та струмів (б) корозії у 0,1 М розчині HNO₃ контактної (1, 3) та зовнішньої (2, 4) поверхонь модифікованих протягом 30 хв у змінному магнетному полі зразків аморфного стовпу Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0} залежно від кількості циклів сканування потенціалу за швидкості розгортки потенціалу 10 (1, 2) та 50 (3, 4) мВ/с.

Fig. 2. Change of corrosion potentials (a) and currents (b) in 0.1 M HNO₃ aqueous solution of contact (1, 3) and external (2, 4) surfaces of modified during 30 min in alternating magnetic field amorphous tape Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}B_{6,0}Si_{14,0} in dependence of the cycle number at potential scanning rates 10 (1, 2) and 50 (3, 4) mV/s.

циклічної вольт-амперометрії можна виділити і оцінити вклад повільніших стадій у корозійні процеси на поверхні досліджуваного аморфного стопу, тоді як швидкість розгортки потенціалу 50 мВ/с створює додаткові навантаження на зразок. Порівняно з вихідними зразками (табл. 2) значення потенціалу корозії дещо зсуваються у катодну сторону, хоча під час контакту з агресивним середовищем вони є достатньо стабільними.

Проведено аналогічні електрохімічні дослідження за різних швидкостей розгортки потенціалу АМС $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$, що містить замість Ni та Mo добавки Cu і Nb (рис. 3). Цей стоп виявився корозійно тривкішим у агресивному середовищі нітратної кислоти. Модифікація зразків аморфного стопу попередньою експозицією у ЗМП зумовлює підвищення його корозійної тривкості, що відображається зсувом потенціалів у анодну сторону. Збільшення тривалості експозиції стопу $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ у ЗМП підвищує корозійну тривкість даного матеріалу у 0,1 М водному розчині нітратної кислоти за нижчої швидкості розгортки потенціалу. Під час контакту з агресивним середовищем електрохімічні параметри практично залишаються незмінними.

Збільшення швидкості сканування потенціалу до 50 мВ/с не чинить додаткового впливу на електрохімічні характеристики АМС $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ (рис. 3), тобто простежуються аналогічні закономірності, що й за нижчої швидкості розгортки потенціалу.

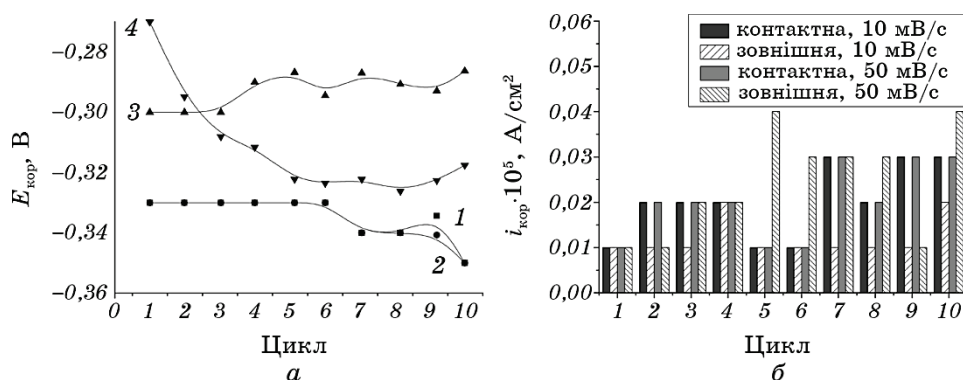


Рис. 3. Зміна потенціалів (а) та струмів (б) корозії у 0,1 М розчині HNO_3 контактної (1, 3) та зовнішньої (2, 4) поверхонь модифікованих протягом 30 хв. у змінному магнетному полі зразків аморфного стопу $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ залежно від кількості циклів сканування потенціалу за швидкості розгортки потенціалу 10 (1, 2) та 50 (3, 4) мВ/с.

Fig. 3. Change of corrosion potentials (a) and currents (b) in 0.1 M HNO_3 aqueous solution of contact (1, 3) and external (2, 4) surfaces of modified during 30 min in alternating magnetic field amorphous tape $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ in dependence of the cycle number at potential scanning rates 10 (1, 2) and 50 (3, 4) mV/s.

4. ВИСНОВКИ

Отже, методами потенціометрії та циклічної вольтамперометрії вперше оцінено корозійну тривкість модифікованих змінним магнетним полем аморфних стопів $\text{Fe}_{78,5}\text{Ni}_{1,0}\text{Mo}_{0,5}\text{B}_{6,0}\text{Si}_{14,0}$ та $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ у водних розчинах нітратної кислоти.

Показано, що зі збільшенням швидкості розгортки потенціалу та збільшенням тривалості попередньої експозиції у змінному магнетному полі потенціали корозії зсуваються в анодну сторону, тобто стопи пасивуються.

За результатами електрохімічних досліджень стопів $\text{Fe}_{73,1}\text{Cu}_{1,0}\text{Nb}_{3,0}\text{Si}_{15,5}\text{B}_{7,4}$ виявився корозійно тривкішим у агресивному середовищі нітратної кислоти, а модифікація ЗМП зумовлює підвищення його корозійної тривкості, що відображається зсувом потенціалів у анодну сторону.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. W. J. Botta, J. E. Berger, C. S. Kiminami, V. Roche, R. P. Nogueira, and C. Bolfarini, *J. Alloy. Compd.*, **586**: S105 (2014).
2. Л. Чалк, М. Косминіна, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Спец. вип. 3: 195 (2002).
3. G. Y. Koga, R. P. Nogueira, V. Roche, A. R. Yavari, A. K. Melle, J. Gallego, C. Bolfarini, C. S. Kiminami, and W. J. Botta, *Surf. Coat. Tech.*, **254**: 238 (2014).
4. Л. Беднарська, М. Ковбуз, Х. Горбачевська, О. Герцик, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Спец. вип. 1: 150 (2000).
5. Т. Гула, О. Херцук, М. Ковбуз, А. Якимович, К. В. Ріхтер, and Н. Пандіак, *Chemistry of Metals and Alloys*, **11**, No. 3/4: 100 (2018).
6. Т. Переверзева, О. Херцук, Н. Пандіак, and А. Борисиук, *Proc. Shevchenko Sci. Soc. Chem. Sci.*, **XLVIII**: 114 (2017).
7. О. Герцик, Т. Переверзева, М.-О. Даниляк, Н. Пандяк, *Вісник Львівського університету. Серія хімічна*, **56**, № 2: 414 (2015).
8. *Рентгеноспектральний мікроаналіз з використанням енергодисперсионного спектрометра* (Санкт-Петербург: ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях»: 2010).
9. О. М. Херцук, М. О. Ковбуз, О. А. Езерська, and Т. Н. Переверзева, *Mat. Sci.*, **47**, No. 3: 401 (2011).
10. V. G. Makletsov, V. V. Zabil'skii, R. M. Nikonova, and A. V. Busygin, *Rus. J. Electrochem.*, **37**, No. 3: 378 (2001).
11. В. Г. Маклецов, *Вестник Удмуртского университета. Серия Физика и химия*, **2**: 30 (2011).
12. V. G. Makletsov and O. M. Kanunnikova, *Prot. Met. Phys. Chem.*, **45**, No. 3: 353 (2009).
13. О. М. Херцук, М. А. Ковбуз, Т. Г. Переверзева, Л. М. Боичишын, and В. Я. Котур, *Rus. J. Appl. Chem.*, **86**, No. 6: 802 (2013).
14. О. Герцик, Т. Гула, М. Ковбуз, Н. Сеньків, *Вісник Львівського*

університету. Серія хімічна, **60**, № 2: 434 (2019).

REFERENCES

1. W. J. Botta, J. E. Berger, C. S. Kiminami, V. Roche, R. P. Nogueira, and C. Bolfarini, *J. Alloy. Compd.*, **586**: S105 (2014).
2. L. Chalk and M. Kosmynina, *Physicochemical Mechanics of Materials*, Spec. Iss. 3: 195 (2002) (in Ukrainian).
3. G. Y. Koga, R. P. Nogueira, V. Roche, A. R. Yavari, A. K. Melle, J. Gallego, C. Bolfarini, C. S. Kiminami, and W. J. Botta, *Surf. Coat. Tech.*, **254**: 238 (2014).
4. L. Bednars'ka, M. Kovbuz, Kh. Horbachevs'ka, and O. Hertsyk, *Physicochemical Mechanics of Materials*, Spec. Iss. 1: 150 (2000) (in Ukrainian).
5. T. Hula, O. Hertsyk, M. Kovbuz, A. Yakymovych, K. W. Richter, and N. Pandiak, *Chemistry of Metals and Alloys*, **11**, No. 3/4: 100 (2018).
6. T. Pereverzieva, O. Hertsyk, N. Pandiak, and A. Borysiuk, *Proc. Shevchenko Sci. Soc. Chem. Sci.*, **XLVIII**: 114 (2017).
7. O. Hertsyk, T. Pereverzyeva, M.-O. Danylyak, and N. Pandyak, *Visnyk L'vivs'koho Universytetu. Seriya Khimichna*, **56**, No. 2: 414 (2015) (in Ukrainian).
8. *Rentgenospektral'nyy Mikroanaliz s Ispol'zovaniem Energodispersionnogo Spektrometra [X-ray Microanalysis with Energy-Dispersion Spectrometer]* (Saint Petersburg: TsKP «Materialovedenie i Diagnostika v Peredovykh Tekhnologiyakh»: 2010) (in Russian).
9. O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, O. A. Ezers'ka, and T. H. Pereverzeva, *Mat. Sci.*, **47**, No. 3: 401 (2011).
10. V. G. Makletsov, V. V. Zabil'skii, R. M. Nikonova, and A. V. Busygin, *Rus. J. Electrochem.*, **37**, No. 3: 378 (2001).
11. V. G. Makletsov, *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya Fizika i Khimiya*, **2**: 30 (2011) (in Russian).
12. V. G. Makletsov and O. M. Kanunnikova, *Prot. Met. Phys. Chem.*, **45**, No. 3: 353 (2009).
13. O. M. Hertsyk, M. A. Kovbuz, T. G. Pereverzeva, L. M. Boichyshyn, and B. Ya. Kotur, *Rus. J. Appl. Chem.*, **86**, No. 6: 802 (2013).
14. O. Hertsyk, T. Hula, M. Kovbuz, and N. Sen'kiv, *Visnyk L'vivs'koho Universytetu. Seriya Khimichna*, **60**, No. 2: 434 (2019) (in Ukrainian).