

УДК 544.138

О.М. Герцик, Т.Г. Переверзева, М.О. Ковбуз, Л.М. Бойчишин

ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ ТА ЗМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНУ ПОВЕДІНКУ ПОВЕРХНІ АМОΡФНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 6, Львів, 79005, Україна, E-mail: o_hertsyk@yahoo.com

Електрохімічними методами та рентгеноспектральним мікроаналізом досліджено вплив термообробки та дії змінного магнітного поля на хімічний опір легованих Ni, Cu, Mo, Nb аморфних металічних сплавів на основі Fe у 0.5 M водному розчині NaCl. Показано, що підбором режиму температурно-магнітної модифікації можна підвищувати та знижувати корозійну стійкість сплавів. Дія термообробки та змінного магнітного поля сприяє виходу на поверхню елементів, які входять до складу сплаву.

Ключові слова: сплави на основі заліза, термообробка, магнітна обробка, хімічний опір, корозійна стійкість

ВСТУП

Аморфні і нанокристалічні матеріали мають високу корозійну стійкість. Механічна обробка сплавів на основі Fe приводить до поверхневої реструктуризації. Потенціал вільної корозії електрополірованих сплавів коливається біля -0.67 ± 0.01 В і не залежить від концентрації аморфізаторів, наприклад, кремнію, в сплаві [1]. Порушення складу поверхневих меж зерен спричиняє зміну електрохімічних параметрів аморфних сплавів.

Межі зерен на поверхні нанорозмірні і знаходяться в шарах завтовшки не більше 100 нм, але вплив їх на електрохімічні характеристики суттєвий. Їхня зміна може викликати зміну формального механізму як анодної, так і катодної реакції. Однак, основним фактором, що впливає на електрохімічну поведінку аморфних металевих сплавів (АМС), є не термообробка, що підвищує стійкість та розмір зерен, а те, що вона викликає зміну поверхневого співвідношення легуючих додатків на поверхні зерен. Попри невелику глибину сегрегації домішок на поверхні (10–100 Å) і невеликий сумарний вміст, їх вплив на електрохімічні параметри може бути найбільшим [2, 3].

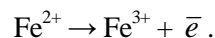
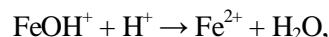
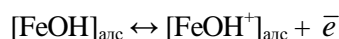
Молекули розчинника (води) та наявні в розчині йони, взаємодіючи з поверхнею

електрода, утворюють хімічні зв'язки з поверхневими атомами. Внаслідок хемосорбції йонів виникають поверхневі хімічні сполуки, тобто формуються поверхневі кластери.

Відомо, що результатом першої стадії взаємодії феруму з водними розчинами є утворення поверхневих гідроксидів:



які вступають в дальші перетворення і йонізуються:



Швидкість цих електродних реакцій залежить експоненціально від потенціалу електрода

$$i = K_a \alpha_{\text{OH}^-}^2 \exp(1 + \alpha_a) F (E/RT).$$

Отже, швидкість окиснення поверхні АМС у водних середовищах залежить від активності гідроксид-іонів (α_{OH^-}) і частки необоротного перенесення OH^- . Лімітуючою стадією цього процесу є йонізація $(\text{FeOH})_{\text{адс}}$. Таким чином відбувається руйнування поверхневих сполук – кластерів захисних шарів.

ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктами дослідження були зразки аморфних сплавів на основі феруму: $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$, $\text{Fe}_{73.1}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.0}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{7.4}$ та $\text{Fe}_{80.0}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ у вигляді стрічок завширшки 2 см і завтовшки 25 мкм, одержаних методом спінінгування (Інститут металофізики НАН України, м. Київ). Внаслідок способу отримання розрізняється контактний (к) та зовнішній (з) боки стрічки АМС.

Термічна обробка зразків аморфних сплавів проводилась в муфельній печі типу СНОП-16.2.5/9-Н5 при температурах 373 та 473 К, які не впливають на зміну аморфності зразків [4], тривалість ізотермічної обробки (ТО) становила 1 год. Вплив магнітного поля здійснювався витриманням їх у змінному магнітному полі (ЗМП) частотою 50 Гц, тривалість експозиції – 1 та 3 год.

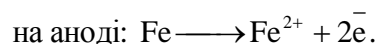
Хронопотенціометрична оцінка корозійної стійкості зразків у 0.5 М водному розчині NaCl проводилась шляхом дослідження кінетики встановлення стаціонарного потенціалу (E_c) контактних та зовнішніх боків стрічки АМС з допомогою потенціостату Jaisle Potentiostat / Galvanostat IPM PC-R: робочий електрод – стрічка АМС, електрод порівняння – хлорсрібний ($E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}} = 0.222 \text{ В}$).

Для дослідження параметрів електрохімічної поведінки аморфних сплавів використовувалась вольтамперометрична методика в потенціодинамічному режимі з автоматичною циклічною розгорткою в часі заданого потенціалу поверхні АМС, що дозволяє реєструвати не тільки утворення та нагромадження продуктів електрохімічних процесів, але й також контролювати їх послідовні перетворення. Робочим електродом була пластинка з досліджуваного аморфного сплаву площею $\approx 0.15 \text{ см}^2$, хлорсрібний електрод порівняння $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}_{\text{нас}}$ та допоміжний електрод – платинова пластинка (0.75 см^2). Дослідження проводили на приладі Jaisle Potentiostat / Galvanostat IPM PC-R у 0.5 М водному розчині NaCl, швидкість розгортки потенціалу – 20 мВ/с. За результатами вольтамперометричних досліджень будували відповідні поляризаційні криві. Величини струмів ($i_p, \text{ А/см}^2$), потенціалів ($E_p, \text{ В}$) та коефіцієнт Тафеля ($b, \text{ В}$) визначали з тафелівських ділянок вольтамперних кривих на основі дотичних кривих:

$$b = (E_2 - E_1) / (\lg i_2 - \lg i_1),$$

де E_1, E_2 – потенціали висхідної анодної гілки тафелівської ділянки, B ; i_1, i_2 – струми, які відповідають вказаним потенціалам, А/см^2 . Характеристики розчинення сплаву стосуються стадії утворення Fe^{2+} [5].

У водних середовищах в присутності кисню відбуваються наступні процеси:



Мікроскопічні дослідження проводили за допомогою скануючої електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу на базі електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА – 102-02 [6].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

З метою оцінки процесів, що відбуваються на поверхні аморфних сплавів в контакті з агресивним середовищем, в першу чергу проведено хронопотенціометричне дослідження зразків АМС у 0.5 М водному розчині NaCl окремо для контактних та зовнішніх боків стрічки сплаву (табл. 1).

Значення стаціонарних потенціалів (E_c) для кожного із сплавів після одно- чи тригодинної обробки ЗМП практично не розрізняються. Комбінована дія ЗМП та термообробки на АМС $\text{Fe}_{73.1}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.0}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{7.4}$ зсуває стаціонарні потенціали у анодний бік на 0.10–0.12 В, що свідчить про стабілізацію поверхні сплаву. Для АМС $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{B}_{6.0}\text{Si}_{14.0}$, навпаки, спостерігається незначна активація поверхні і зсув стаціонарних потенціалів у катодний бік на 0.02–0.04 В.

Для дослідження поведінки зразків у агресивному середовищі під дією зовнішніх навантажень використовувалась вольтамперометрична оцінка хімічної активності АМС із примусовим циклічним скануванням потенціалу в межах (–1.2÷+0.2) В із швидкістю розгортки – 20 мВ/с.

На вольтамперограмах вихідних зразків АМС $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ та $\text{Fe}_{73.1}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.0}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{7.4}$ (рис. 1) у 0.5 М водному розчині NaCl спостерігаються дві характерні ділянки, які відповідають стадійному переходу Fe^0 до Fe^{2+} та Fe^{3+} [5]. Руйнується окиснена поверхня сплавів під час їхнього контакту з агресивним середовищем, про що свідчить

збільшення величини струмів, особливо ділянки, що відповідає переходу до Fe^{3+} . Під час циклічного сканування потенціалу значення E_p зсуваються в катодну область.

Таблиця 1. Вплив змінного магнітного поля (ЗМП) та термообробки (ТО) (1 год при 473 К) на параметри хронопотенціометричного дослідження аморфних металевих сплавів (АМС) у 0.5 М водному розчині NaCl

АМС	Обробка	Бік	-E ₀ , В	-E _c , В	ΔE , В
Fe _{73.1} Cu _{1.0} Nb _{3.0} Si _{15.5} B _{7.4}	–	к	0.43	0.44	0.01
		з	0.33	0.42	0.09
	ЗМП (1 год)	к	0.34	0.45	0.11
		з	0.27	0.45	0.18
	ЗМП (3 год)	к	0.35	0.46	0.11
		з	0.38	0.46	0.08
	ЗМП (1 год) + ТО	к	0.10	0.29	0.19
		з	0.32	0.45	0.13
	ЗМП (3 год) + ТО	к	0.14	0.29	0.15
		з	0.10	0.31	0.21
	ТО + ЗМП (1 год)	к	0.22	0.32	0.10
		з	0.17	0.36	0.19
	ТО + ЗМП (3 год)	к	0.13	0.26	0.13
		з	0.19	0.38	0.19
Fe _{78.5} Ni _{1.0} Mo _{0.5} Si _{6.0} B _{14.0}	–	к	0.52	0.62	0.10
		з	0.50	0.66	0.16
	ЗМП (1 год)	к	0.44	0.56	0.12
		з	0.40	0.56	0.16
	ЗМП (3 год)	к	0.47	0.55	0.08
		з	0.48	0.55	0.07
	ЗМП (1 год) + ТО	к	0.55	0.66	0.11
		з	0.52	0.59	0.07
	ЗМП (3 год) + ТО	к	0.53	0.66	0.13
		з	0.50	0.63	0.13
	ТО + ЗМП (1 год)	к	0.55	0.66	0.11
		з	0.54	0.66	0.12
	ТО + ЗМП (3 год)	к	0.55	0.68	0.13
		з	0.54	0.67	0.13

Форма вольтамперограм залежить від кількісного складу сплаву (рис. 1 а, б). У 0.5 М водному розчині NaCl стійкішим виявився сплав Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}, у порівнянні з Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}. Однак, циклічна зміна потенціалу приводить до руйнування захисних поверхневих плівок, які у випадку легування сплавів міддю є досить стійкими (рис. 1 а, б).

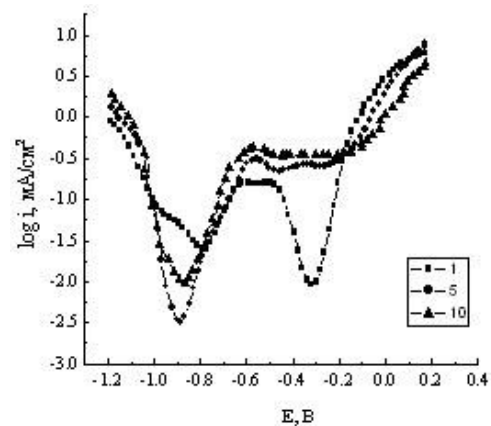
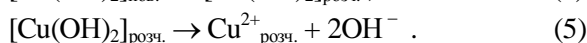
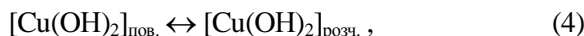
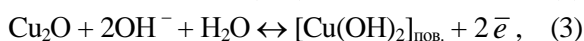
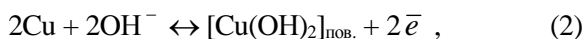
Необхідно враховувати, що поверхня зразків в умовах довготривалого контакту з агресивним середовищем під час циклічного сканування потенціалу піддається одночасно хімічному та електрохімічному навантаженню, тобто зразок потрапляє в екстремальні умови випробувань [7, 8].

Порівняння електрохімічних параметрів розчинення аморфних сплавів на базі Fe з

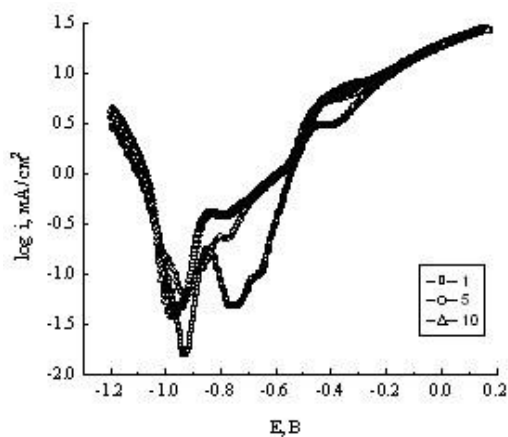
металічними компонентами Cu, Nb (Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{2.4}Si_{15.5}B_{7.4}) та без них (Fe_{80.0}Si_{6.0}B_{14.0}) дає підставу виявити відмінності механізмів [9].

Результати вольтамперометричних досліджень свідчать про різний механізм анодного розчинення аморфних сплавів Fe_{80.0}Si_{6.0}B_{14.0} та Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{2.4}Si_{15.5}B_{7.4}. Аналіз форми вольтамперограм підтверджує загалом вищу корозійну стійкість у хлоридному середовищі при 293 К сплаву Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{2.4}Si_{15.5}B_{7.4}. Анодні струми розчинення цього сплаву значно нижчі від струмів нелегованого (рис. 2). Одночасно з розчиненням заліза можуть відбуватись наступні процеси:





а



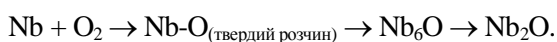
б

Рис. 1. Вольтамперограми контактної боку АМС $\text{Fe}_{73.1}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.0}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{7.4}$ (а) і $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ (б) у 0,5 М водному розчині NaCl (1, 5, 10 – номери циклів)

Порівняння форми вольтамперограм за однакових режимів реєстрації свідчить про порівняно вищу інертність багатокомпонентного сплаву.

Швидкість електродних реакцій (1) та (2) залежить від величини електродного потенціалу. Швидкість анодного процесу в цілому визначається швидкістю доставки молекул води в зону реакції і виходу іонів Cu^{2+} в розчин.

Слід зазначити, що ніобій адсорбує кисень, утворюючи тверді розчини



Оксиди Nb нижчих ступенів окиснення мають електронну провідність. Оксиди вищих ступенів окиснення (наприклад, Nb_2O_5), які є ковалентними сполуками і мають низьку електронну провідність, створюють пасивуючий шар на поверхні АМС електрода [10].

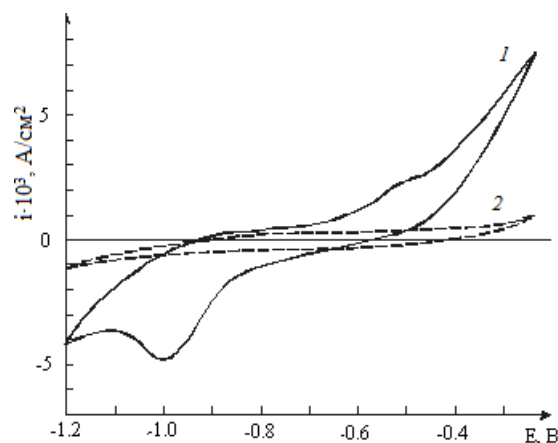


Рис. 2. Циклічні вольтамперограми аморфного сплаву $\text{Fe}_{80.0}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ (1) та $\text{Fe}_{73.7}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{2.4}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{7.4}$ (2) у 0,5 М водному розчині NaCl

З порівняння подібного окиснювального механізму розчинення заліза [11] видно, що початкові електродні реакції аналогічні і для Cu. Однак, у випадку Fe тільки $(\text{FeOH})_{\text{адс}}$ залишається на поверхні, а наступні окиснені частинки Fe^{2+} та Fe^{3+} відразу виходять у розчин, тоді як інтермедіати процесу окиснення Cu залишаються на поверхні і таким чином гальмують розчинення Феруму.

Попереднє тригодинне витримування зразків АМС у ЗМП повністю змінює форму їх вольтамперограм у 0,5 М водному NaCl (рис. 3 а, б). Внаслідок тривалої дії ЗМП багатостадійне окиснення АМС спрощується, особливо першого циклу, тобто коли відбувається електрохімічна реакція на самочинно окисненій поверхні.

Електрохімічні характеристики АМС $\text{Fe}_{73.1}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.0}\text{Si}_{15.5}\text{B}_{7.4}$ та $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$, відпалених (1 год) при 473 К і витриманих у ЗМП протягом 3 год (табл. 1, 2), свідчать про вплив порядку модифікації зразків на швидкість анодного розчинення.

За допомогою електронного рентгенівського мікроаналізу встановлено елементний склад АМС до і після зовнішніх навантажень (табл. 3). Наведені результати є усередненими з 5 вимірів у різних точках поверхні. Відхилення окремих вимірів дозволяють усереднення з

похибкою $\Delta g = \pm 0.04$. Для сплавів АМС $Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$ і $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$ ЗМП сприяє значному виходу на поверхню заліза та бору, тобто утворюється сполука Fe_3B .

У випадку АМС $Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$ ЗМП сприяє руйнуванню оксидних шарів і виходу на поверхню Ni, а Mo мігрує з об'єму у вигляді оксидів [12].

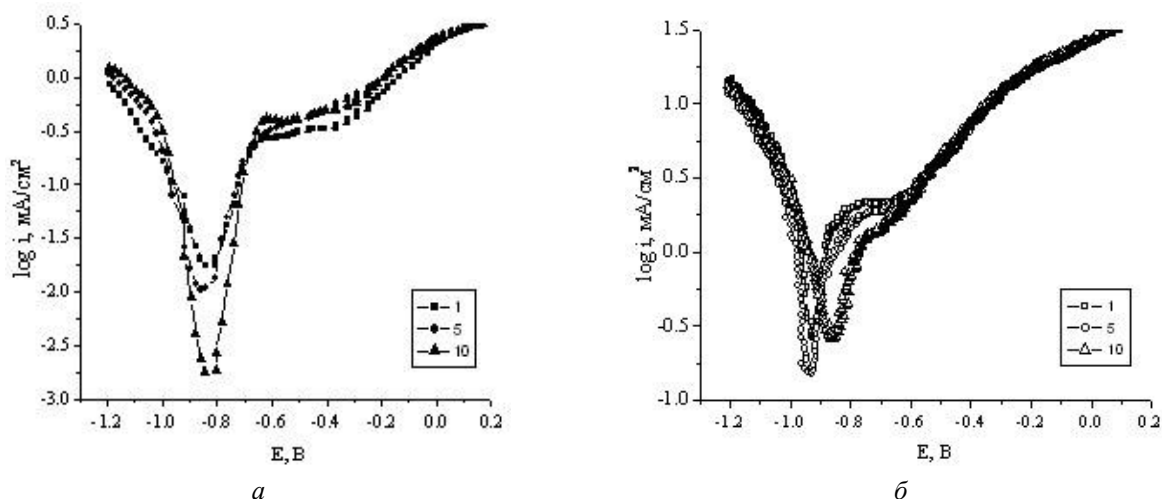


Рис. 3. Вольтамперограми контактної боки АМС $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$ (а) і $Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$ (б) у 0,5 М водному розчині NaCl, витриманого 3 год у ЗМП (1, 5, 10 – номери циклів)

Таблиця 2. Параметри анодного розчинення АМС, підданого обробці в ЗМП (3 год) і термообробці при 473 К (1 год), в залежності від кількості циклів сканування потенціалу у 0.5 М водному розчині NaCl

Цикл	Бік	Обробка					
		ЗМП + ТО			ТО + ЗМП		
		$-E_p, V$	$i_p \cdot 10^5, A/cm^2$	b, V	$-E_p, V$	$i_p \cdot 10^5, A/cm^2$	b, V
$Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.44}$							
1	к	0.96	1.15	0.26	0.96	4.87	0.59
	з	0.97	0.53	0.35	0.84	2.30	0.58
5	к	0.94	2.23	0.31	0.91	3.10	0.40
	з	0.97	1.20	0.36	0.93	2.40	0.48
10	к	0.93	2.21	0.29	0.90	2.75	0.35
	з	0.94	0.69	0.36	0.88	4.00	0.46
$Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$							
1	к	0.80	5.06	0.44	0.83	3.94	0.56
	з	0.61	6.56	0.52	0.51	7.00	0.60
5	к	0.80	4.69	0.44	0.84	3.95	0.59
	з	0.61	5.19	0.50	0.59	7.20	0.66
10	к	0.78	3.80	0.39	0.85	4.26	0.62
	з	0.63	5.25	0.54	0.64	7.06	0.69

Таблиця 3. Елементний склад вихідних АМС до і після магнітної та термічної модифікації

Сплав	$Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.44}$					$Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$				
	Fe	Cu	Nb	Si	B	Fe	Ni	Mo	Si	B
вихідні зразки	73.10	1.00	3.00	15.50	7.40	78.50	1.00	0.50	14.00	6.00
3 год ЗМП	74.63	1.20	3.10	10.07	11.00	81.42	0.63	1.07	5.18	11.70
1 год ТО										
373 К + 3 год ЗМП	68.37	1.26	5.03	12.32	13.02	80.97	0.93	1.15	5.22	11.73

У поверхневих шарах сплаву $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$, відпаленого 1 год при 373 К та підданого тригодинному намагні-

ченню, спостерігається зменшення вмісту Fe та підвищення ат. % Cu, Nb, які, навпаки, утворюють щільні оксидні шари.

Влияние термообработки и переменного магнитного поля на элементный состав и электрохимическое поведение поверхности аморфных сплавов на основе железа

О.М. Герцук, Т.Г. Переверзева, М.А. Ковбуз, Л.М. Бойчишин

*Львовский государственный университет имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 6, Львов, 79005, Украина, o_hertsyk@yahoo.com*

Электрохимическими методами и рентгеноспектральным микроанализом исследовано влияние термообработки и действия переменного магнитного поля на химическое сопротивление легированных Ni, Cu, Mo, Nb аморфных сплавов на основе Fe в 0.5 М водном растворе NaCl. Показано, что подбором режима температурно-магнитной модификации можно повышать и снижать коррозионную стойкость сплавов. Действие термообработки и переменного магнитного поля способствует выходу на поверхность элементов, которые входят в состав сплава.

Ключевые слова: сплавы на основе железа, термообработка, магнитная обработка, химическое сопротивление, коррозионная стойкость

Influence of heat treatment and variable magnetic field on elemental composition and electrochemical behavior of the surface of amorphous iron alloys

O.M. Hertsyk, T.G. Pereverzeva, M.A. Kovbuz, L.M. Boichyshyn

*Ivan Franko National University of Lviv
6 Kyryla & Mefodiya Str., Lviv, 79005, Ukraine, o_hertsyk@yahoo.com*

By electrochemical methods and X-ray spectroscopy microanalysis the influence has been investigated of heat treatment and action of variable magnetic field on chemical resistance of Ni, Cu, Mo, Nb alloyed amorphous iron alloys in 0,5 M aqueous solution of NaCl. It has been shown that we can increase and decrease corrosive firmness of the alloy by using different temperature-magnetic modes of modification. The actions of heat treatment and variable magnetic field assist wedging out elements included in alloy composition.

Keywords: iron alloys, heat treatment, magnetic treatment, chemical resistance, corrosion stability

ЛІТЕРАТУРА

1. Маклецов В.Г. Электрохимические свойства наноструктур на основе железа при кислотной коррозии // Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. – 2011. – Вып. 2. – С. 30–42.
2. Шапник М.С. Квантово-химический подход к исследованию электродных процессов осаждения и анодного растворения металла // Электрохимия. – 1994. – Т. 30, № 2. – С. 143–149.
3. Ryusuke Hasegawa. Advances in amorphous and nanocrystalline magnetic materials //

- J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – V. 304. – P. 187–191.
4. *Hertsyk O.M., Kovbuz M.O., Bednarska L.M., Kotur B.Ya.* Influence of thermal treatment on adsorption ability of amorphous alloys // *Adsorpt. Sci. Technol.* – 2002. – V. 20, N 6. – P. 579–587.
 5. *Білик О.М.* Кінетика електрохімічних реакцій з участю кисневих сполук на аморфних металевих поверхнях: Дис. на здобуття наук. ступ. канд. хім. наук: 02.00.05 / ЛНУ ім. Івана Франка. – Львів, 1995. – 123 с.
 6. *Тузяк О.Я., Курляк В.Ю.* Основи електронної та зондової мікроскопії. – Львів: Вид. ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. – 296 с.
 7. *Герцик О., Ковбуз М., Беднарська Л., Кавчак Н.* Особливості електрохімічного розчинення аморфного сплаву $Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{2.4}Si_{15.5}B_{7.4}$ // *Вісник Львів. ун-ту. Серія хім.* – 2003. – Вип. 43. – С.205–208.
 8. *Kovacs P., Farkas J., Takacs L. et al.* Effect of composition and the processing parameters on the electrochemical corrosion of iron-boron metallic glasses // *J. Electrochem. Soc.* – 1982. – V. 129, N 4. – P. 695–700.
 9. *Kovbuz M.O., Hertsyk O.M., Bednarska L.M.* The peculiarity of adsorption of inorganic and organic nitrogen containing compounds on amorphous metal surfaces // *Adsorpt. Sci. Technol.* – 1999. – V. 17. – P. 565–574.
 10. *Li Liu, Ying Li, Fuhui Wahg.* Electrochemical corrosion behaviour of nanostructured materials // *Nanostructured Materials in Electrochemistry / Avicenna Institute of Technology, Cleveland, Ohio, USA; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.* – 2007. – P. 291–317.
 11. *Киш Л.М.* Кинетика электрохимического растворения металлов. – Москва: Наука, 1990. – 295 с.
 12. *Мудрий С.І., Беднарська Л.М., Ковбуз М.О. та ін.* Трансформація структури при термо- та термомагнітній обробці аморфних сплавів на основі кобальту // *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2005. – № 9. – С. 1187–1191.

Надійшла 03.09.2013, прийнята 15.01.2014