

Марина ВЕДЬ, Микола САХНЕНКО, Ірина ЄРМОЛЕНКО, Юлія САЧАНОВА

КОРОЗИЙНА ТРИВКІСТЬ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИВІВ Fe-Co-Mo

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: kirilesha72@gmail.com*

Maryna VED', Mykola SAKHNENKO, Iryna YERMOLENKO, Yuliya SACHANOVA

THE CORROSION RESISTANCE OF GALVANIC Fe-Co-Mo COATINGS

*National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»
2, Kyrpychova St., Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: kirilesha72@gmail.com*

ABSTRACT

A comparative analysis of the results of the morphology, phase composition and corrosion resistance study for samples with coatings Fe(Co)-Mo and Fe-Co-Mo deposited by direct current is carried out. It is shown that Fe-Co-Mo coatings are characterized by the globular structure with spheroid size of 2–2.5 μm , and surface is more uniform compared to the bimetallic ones. According to the results of X-ray diffraction analysis, the formation of mixed amorphous-crystalline structure of a ternary alloy with the formation of intermetallics Fe₇Mo, Fe₇Co, FeCo was established. Increase in molybdenum content from 13 at. % to 38 at. % does not change the phase composition of the alloy, but decreases the size of the coherent scattering zone from 6.6 nm to 5.3 nm. The corrosion behavior of the coatings was investigated by methods both the electrode impedance spectroscopy and polarization dependence analysis. Fe-Co-Mo alloys exhibit high corrosion resistance in all model media due to the chemical properties of alloying metals. The corrosion current of ternary coatings is 1.3 and 1.6 orders of magnitude lower than that of mild steel substrate and binary Fe(Co)-Mo alloys respectively. According to the SEI results, an equivalent circuit representing the corrosion of coated with Fe-Co-Mo samples was constructed, which contains two imperfect capacitors (CPE1 = 0.90, CPE2 = 0.66) and the inductance resistance. The corrosion resistance of samples coated with Fe-Co-Mo alloy in 2% NaCl solution is 3400 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, which is explained by the formation of variable valence molybdenum oxide layer on the coating surface. Diagrams «composition – depth corrosion index k_n , mm/year» for the Fe – Co – Mo system are constructed, which allow to determine the optimal composition of alloy coatings Fe(Co)-Mo, Fe-Co-Mo with the required resistance for corrosion protection, depending on the operating conditions.

KEY WORDS: *electrode impedance spectroscopy, electrolytic alloys, iron-cobalt-molybdenum, corrosion resistance, phase composition.*

ВСТУП

Підвищення експлуатаційної надійності та терміну служби металевих конструкцій, деталей машин і механізмів є одним із головних шляхів економічно вигідного використання матеріальних ресурсів [1]. Вирішення цього питання, головним чином, полягає в зміцненні та захисті від корозії металевих поверхонь. Одним із ефективних методів такого захисту вважається нанесення гальванічних корозійнотривких покриттів, серед яких пильна увага приділяється саме аморфним і наноструктурованим сплавам на основі металів родини феруму з тугоплавкими компонентами, зокрема молібденом і вольфрамом [2]. Так, при легуванні покриттів заліза молібденом автори [3-5] відмічають перехід структури сплаву від кристалічної до аморфної при вмісті молібдену понад 20 at.% і формування рівномірної поверхні, що забезпечує підвищення корозійної тривкості. Бінарним покриттям Co-Mo також властиві поліпшені зносостійкість і корозійна тривкість, порівняно з монометалевими аналогами [6]. Автори відмічають суттєвий вплив на корозійну тривкість не тільки співвідношення сплавотвірних металів у покритті, а й структури осадів. За даними [7], аморфна структура характерна для тонких плівок. Результати досліджень корозійної тривкості покриттів Ni-W і Fe-Ni-W [8, 9] свідчать про більшу корозійну тривкість тернарного сплаву порівняно із подвійним. Автори [10] відмічають, що інкорпорація заліза у склад покриттів Ni-W сприяє

підвищенню міцності зчеплення з матеріалом катода і зменшенню внутрішніх напружень, за рахунок чого покращуються властивості сплаву.

Попередні дослідження з електрохімічного синтезу сплавів Fe-Mo-W і Fe-Co-W [11, 12] довели можливість варіативної комбінації у покриттях високих корозійної тривкості та фізико-механічних і каталітичних властивостей, що підтверджує перспективність формування тернарних гальванічних систем на основі заліза.

Роботу присвячено дослідженню корозійної тривкості тернарних Fe-Co-Mo покриттів, осаджених на постійному струмі з цитратних комплексних електролітів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Покриття Fe-Co-Mo осаджували на зразки з низьковуглецевої сталі (Ст3) з цитратного електроліту [11] при температурі 25–30 °С, pH 4,6–4,8. Електроосадження здійснювали постійним струмом густиною 2–4 A/dm² із застосуванням приладу Б5-47. Анод – пластина з нержавіючої сталі; співвідношення площин катода до аноду становило $S_c/S_a = 1:5$, об'ємна густина струму не перевищувала 2 A/dm³.

Хімічний склад та морфологію покриттів визначали методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії із застосуванням електронно-зондового мікроаналізатора Oxford INCA Energy 350. В роботі склад покриттів наведено в ат. % у перерахунку на метал.

Дослідження фазового складу покриттів проводили методом рентгеноструктурного аналізу із застосуванням рентгенівського дифрактометра ДРОН-2 у монохроматизованому випромінюванні Co-K_α ($\lambda = 1,7902 \text{ \AA}$), з реєстрацією дифрактограм у дискретному режимі з кроком $2\theta = 0,1^\circ$ і експозицією в кожній точці 20 сек при діючій напрузі 35 кВ і струмі 20 мА. Розмір ділянок когерентного розсіювання L визначали за рівнянням Селякова-Шерера [13].

Дослідження корозійної стійкості зразків з покриттями проводили методом аналізу даних лінійної вольтамперометрії (ЛВА), який передбачає побудову катодної і анодної гілок вольтамперограм у напівлогарифмічних координатах в інтервалі потенціалів $\pm 50 \text{ mV}$ від потенціалу вільної корозії. Тестування зразків проводили у модельних середовищах (табл. 1).

Таблиця 1. Модельні середовища для дослідження корозійної тривкості покриттів Fe-Co-Mo

Table 1. Model environments for the study of corrosion resistance of Fe-Co-Mo coatings

Model environment	pH	Research method
1M Na ₂ SO ₄ , 0.001M H ₂ SO ₄	3	LVA
3 % NaCl	7	
1M Na ₂ SO ₄ , 0.001M NaOH	10	
2 % NaCl	7	SEI

Верифікацію результатів корозійних тестів здійснювали методом спектроскопії електродного імпедансу (CEI) [14] у середовищі 2 % NaCl. CEI реєстрували в двохелектродній комірці на електродах площею 1 см², планарно розташованих на відстані 1 см один від одного. Для вимірювань використовували електрохімічний модуль Autolab-30, оснащений модулем FRA-2 (Frequency Response Analyzer) в інтервалі частот 10⁻² – 10⁶ Hz. Моделювання будови та стану межі розділу фаз виконували методом еквівалентних схем заміщення. До розгляду прийнято параметри з похибкою моделювання еквівалентного ланцюга не більш 10 %.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Поверхня бінарних покриттів Fe₇₈Mo₂₂ (ат. %) має глобулярну структуру, що складається з агломератів розміром до 5 μm, сформованих із менших за розмірами зерен сфероїдальної форми (рис. 1 а). Покриття характеризуються поруватістю, яка збільшується з підвищенням густини струму [15]. Для покриттів Co₇₆Mo₂₄ (ат. %) характерно формування більш рівномірної поверхні з поодинокими розташованими глобулами розміром до 5 μm. Але кобальт-молібденові покриття відрізняються тріщинуватістю, пов'язаною із внутрішніми напруженнями, які виникають при співосадженні металів з різними кристалічними ґратками (рис. 1 б) [15]. Тернарні покриття Fe-Co-Mo, осаджені на постійному струмі, є суцільними і безпоруватими, відрізняються мікроглобулярною структурою та більш рівномірним рельєфом поверхні порівняно з біметалевими сплавами (рис. 1 с, д). Вміст молібдену залежно від густини струму

коливається у межах від 16 at. % до 38 at. % (у перерахунку на метал) [15], при цьому збагачення сплаву молібденом сприяє збільшенню діаметру сфероїдів (рис. 1 *c, d*). Покриви мають хорошу адгезію до сталевій підкладки та зберігають її за механічних навантажень.

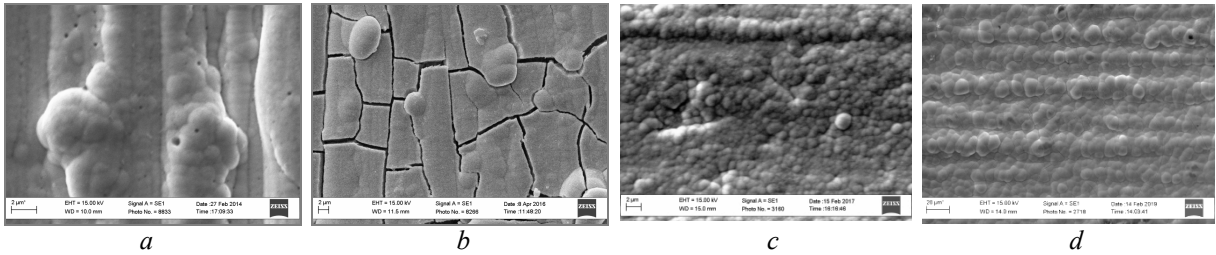


Рис. 1. Морфологія поверхні покриттів, at. %: *a* – $\text{Fe}_{78}\text{Mo}_{22}$; *b* – $\text{Co}_{76}\text{Mo}_{24}$; *c* – $\text{Fe}_{46}\text{Co}_{38}\text{Mo}_{16}$; *d* – $\text{Fe}_{31}\text{Co}_{31}\text{Mo}_{38}$.

Fig. 1. Surface morphology of coatings, at. %: *a* – $\text{Fe}_{78}\text{Mo}_{22}$; *b* – $\text{Co}_{76}\text{Mo}_{24}$; *c* – $\text{Fe}_{46}\text{Co}_{38}\text{Mo}_{16}$; *d* – $\text{Fe}_{31}\text{Co}_{31}\text{Mo}_{38}$.

Проведені раніше дослідження гальванічних покриттів на основі заліза довели суттєву різницю у фазовому складі між бінарними і тернарними сплавами. Так, покриви Fe-Mo з вмістом молібдену понад 20 at. % мають аморфну структуру [15]. За даними [16], гальванічні сплави Co-Mo з вмістом молібдену менше ніж 10 at. % – це твердий розчин молібдену в кобальті, а при зростанні вмісту молібдену утворюється твердий розчин кобальту в Co_3Mo . На відміну від бінарних покриттів на дифрактограмах тернарного сплаву Fe-Co-Mo наявні лінії фаз інтерметалідів Fe_7Mo , Fe_7Co , FeCo поряд з фазами $\alpha\text{-Fe}$ і Fe_3C , що свідчить про формування змішаної аморфно-кристалічної структури (рис. 2), втім лінії інтерметалідів Co_3Mo відсутні. Як видно з рис. 2, покриви з різним вмістом молібдену, осаджені постійним струмом, мають однаковий фазовий склад, але різну інтенсивність відповідних реплік. Проте розмір зони когерентного розсіювання, зменшується з 6,6 nm для $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{36}\text{Mo}_{13}$ до 5,3 nm для $\text{Fe}_{31}\text{Co}_{31}\text{Mo}_{38}$. Отже, збагачення сплаву молібденом сприяє його аморфізації, а зміна співвідношення металів впливає на співвідношення фаз різного складу. Очевидно, що відмінності у кількісному, фазовому складі та морфології поверхні сплавів Fe(Co)-Mo, Fe-Co-Mo впливатимуть на властивості покриттів, зокрема й на їх корозійний опір.

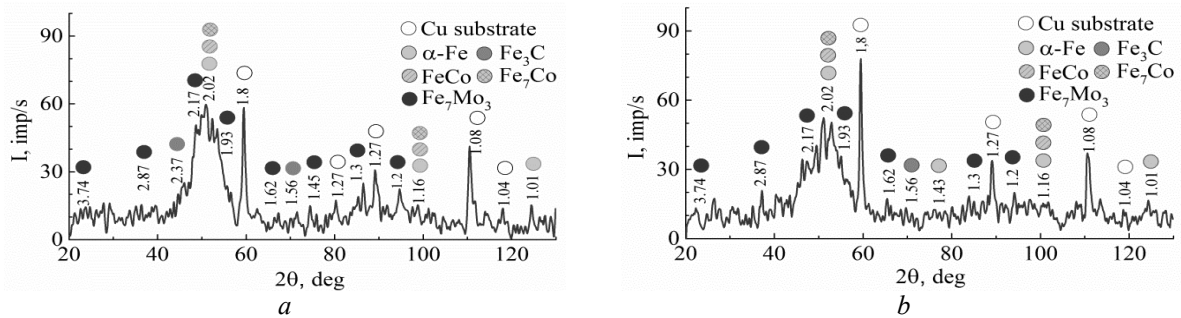


Рис. 2. XRD-діаграми покриттів, at. %: $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{36}\text{Mo}_{13}$ (*a*) і $\text{Fe}_{31}\text{Co}_{31}\text{Mo}_{38}$ (*b*), осаджених постійним струмом.

Fig. 2. XRD patterns for coatings, at. %: $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{36}\text{Mo}_{13}$ (*a*) і $\text{Fe}_{31}\text{Co}_{31}\text{Mo}_{38}$ (*b*), obtained by direct current.

Аналіз результатів тестування корозійної тривкості зразків, вкритих сплавами Fe-Co-Mo різного кількісного складу, свідчить про суттєве підвищення корозійної тривкості порівняно із матеріалом підкладки в усіх корозійних середовищах (табл. 2). Захисна дія покриттів обумовлена хімічними властивостями сплавотвірних металів. Схильність молібдену до пасивації забезпечує зменшення швидкості корозії у кислому та нейтральному середовищі, навіть за наявності хлорид-іонів, внаслідок гальмування анодної реакції завдяки формуванню на поверхні покриттів щільної плівки оксидів молібдену [17]. Розрахований за результатами аналізу поляризаційних залежностей корозійний опір сплавів R_p у 3 %-му розчині NaCl становить $2920 \Omega \cdot \text{cm}^2$ для $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{36}\text{Mo}_{13}$ та $2800 \Omega \cdot \text{cm}^2$ для $\text{Fe}_{31}\text{Co}_{31}\text{Mo}_{38}$. У лужному середовищі, навпаки, відбувається гальмування катодної реакції, що пов'язано із пасивацією поверхні сплавів важкорозчинними гідроксидами феруму і кобальту, які ускладнюють доступ

деполяризатора. З огляду на це, цілком прогнозованим є підвищення корозійної тривкості зразків, вкритих Fe-Co-Mo, у кислому середовищі зі збільшенням вмісту молібдену (табл. 2).

Таблиця 2. Показники корозії сталі та зразків з покриттями Fe(Co)-Mo, Fe-Co-Mo

Table 2. The corrosion indicators of mild steel, and samples coated with Fe(Co)-Mo, Fe-Co-Mo

Electrode materials, ω , at. %	E_{cor} , V			$\lg i_{cor}$, A/cm ²			k_h , mm/year		
	pH 3	pH 7	pH 9–10	pH 3	pH 7	pH 9–10	pH 3	pH 7	pH 9–10
mild steel	-0.34	-0.35	-0.32	-2.8	-3.0	-2.8	1.85	0.93	0.12
Fe ₇₈ Mo ₂₂	-0.26	-0.49	-0.67	-3.3	-3.2	-3.3	0.04	0.04	0.03
Co ₇₆ Mo ₂₄	-0.42	-0.20	-0.43	-3.7	-3.6	-4.1	0.06	0.09	0.06
Fe ₅₁ Co ₃₆ Mo ₁₃	-0.25	-0.30	-0.46	-3.7	-4.9	-5.5	1.17	0.1	0.05
Fe ₃₁ Co ₃₁ Mo ₃₈	-0.16	-0.31	-0.32	-4.5	-4.8	-5.1	0.20	0.07	0.02

Спектри електродного імпедансу (CEI) зразків з покриттям Fe₅₁Co₃₆Mo₁₃ у 2 %-му розчині NaCl у координатах Найквіста і Бодє характеризуються наявністю двох максимумів. Перший, що спостерігається на більш високій частоті, обумовлений відгуком оксидів, наявних на поверхні покриття. Другий, на менших частотах, відповідає безпосередньо корозійному процесу за участю компонентів покриття. Також, в області високих частот додається опір індуктивності L1, пов'язаний з наявністю власних магнітних властивостей у сплавів Fe-Co-Mo [18]. Виникнення гальваноманітного ефекту підтверджується переходом фазового кута на діаграмі Бодє у бік позитивних значень (рис. 3).

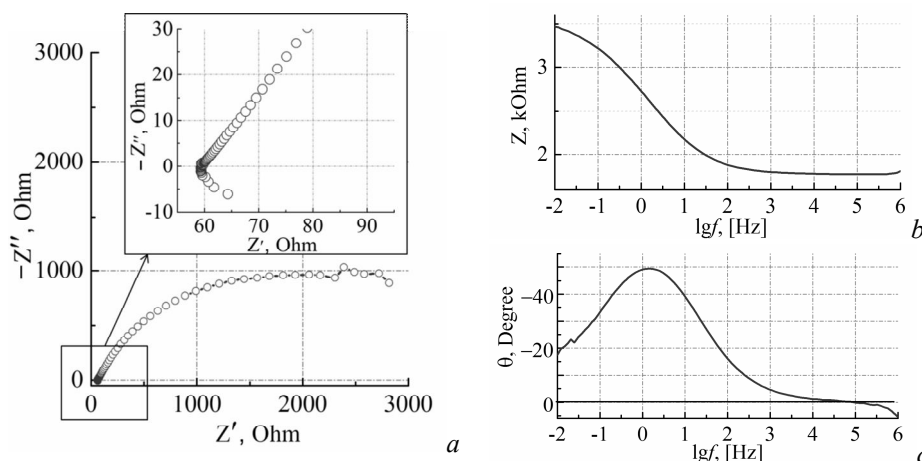


Рис. 3. Діаграми Найквіста (a), Бодє (b, c) для зразків з покриттям Fe₅₁Co₃₆Mo₁₃.

Fig. 3. Nyquist (a) and Bode (b, c) plots for samples coated with Fe₅₁Co₃₆Mo₁₃.

Корозійний процес у системі сталевий підкладок – покриття Fe-Co-Mo можна описати еквівалентною електричною схемою (ЕЕС), з якої визначають параметри, що є кількісними характеристиками хімічного опору. Основу обраної ЕЕС складає схема Войта [19] для мультіфазних систем, яка крім опору електроліту R_s та індуктивності L1 містить елементи: R1 – відповідає електричному опору оксидної плівки на поверхні покриття, CPE1 – недосконалий конденсатор, який відбиває ємність подвійного шару на межі «електроліт – покриття», R2 – опір корозії (так званий фарадеєвський опір), CPE2 – недосконалий конденсатор, який відповідає ємнісному опору оксидного шару (рис. 4).

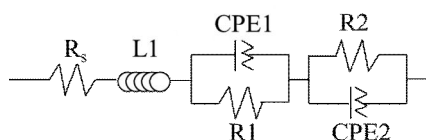


Рис. 4. Еквівалентна схема заміщення процесу корозії системи «сталевий підкладок – покриття Fe-Co-Mo» у 2 %-му розчині NaCl.

Fig. 4. Electric equivalent circuit representing the corrosion process in the system “steel substrate – coating Fe-Co-Mo” in 2 % NaCl solution.

Елементи CPE віддзеркалюють фрактальність фаз, а їх включення у протифазі вказує на ускладнення стадії переносу заряду, що відповідає гальмуванню анодної реакції. Значення параметрів елементів еквівалентної схеми (табл. 3) підтверджують формування захисної плівки

оксидів на поверхні зразків з покриттями. Корозійний опір $R_2 = 3400 \Omega \cdot \text{cm}^2$ знаходяться у відповідності із даними, отриманими за результатами аналізу ЛВА.

Таблиця 3. Значення параметрів еквівалентної схеми ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) і похибки (%) добору параметрів для зразків с покритвом Fe-Co-Mo

Table 3. Values of equivalent circuit parameters ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) and error (%) of parameters fitting for samples coated with Fe-Co-Mo

Coating	R_s	Error, %	R1	Error, %	CPE1	Error, %	CPE2	Error, %	R2	Error, %
Fe-Co-Mo	59.8	0.51	59	0.1	0.9	1.4	0.66	0.52	3400	1.7

На рис. 5 представлені діаграми «склад – глибинний показник корозії k_h , mm/year» для системи Fe – Co – Mo, що побудовані за результатами гравіметричних досліджень корозійної тривкості матеріалу основи – низьковуглецевої сталі, зразків із покриттями бінарними Fe-Mo, Co-Mo і тернарними Fe-Co-Mo сплавами варійованого кількісного складу в корозійних середовищах різної кислотності. Як свідчать представлені результати, лінії зменшення глибинного показника корозії системи Fe – Co – Mo у кислому середовищі зсуваються до куту тугоплавкого компоненту (рис. 5 а). Найявність у складі покритву молибдену забезпечує підвищення корозійної тривкості зазначених сплавів у присутності СГ-іонів (рис. 5 б) порівняно з матеріалом підкладки (Ст3) ($k_h = 1,85 \text{ mm/year}$) за рахунок схильності молибдену до пасивації та підвищеного опору пітинговій корозії [2]. Як видно з рис. 5 с, зона мінімальних k_h у лужному середовищі наближена до ребра Fe-Co. Як було зазначено вище, у лужному середовищі пасивація поверхні покритву відбувається за рахунок утворення важкорозчинних гідроксидів феруму і кобальту, отже збільшення вмісту в тернарних сплавах саме цих металів сприятиме підвищенню корозійної тривкості при $\text{pH} > 10$.

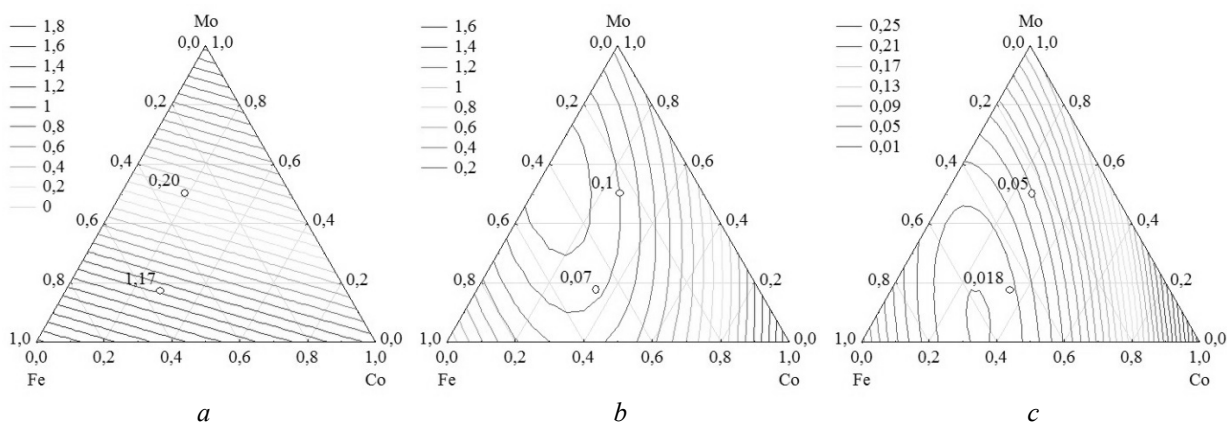


Рис. 5. Діаграма «склад – глибинний показник корозії k_h , mm/year» для системи Fe – Co – Mo у корозивному середовищі (табл. 1): а – pH 3, б – pH 7, с – pH 10.

Fig. 5. Diagram «composition – depth corrosion index k_h , mm/year» for Fe – Co – Mo system in corrosive medium (Table 1): a – pH 3, b – pH 7, c – pH 10.

Побудовані діаграми «склад – глибинний показник корозії k_h , mm/year» не враховують режим (гальваностатичний або імпульсний) осадження, що, звичайно, становить інтерес для подальших досліджень. Проте дані діаграми, по-перше, дозволяють визначити діапазон вмісту металів у бінарних і тернарних сплавах для одержання покриттів, які забезпечують захист від корозії залежно від умов експлуатації; по-друге, доводять, що за складом осаджені покритви Fe-Co-Mo знаходяться у зоні оптимального співвідношення металів для реалізації високої корозійної тривкості (маркери на діаграмах на рис. 5).

ВИСНОВКИ

1. Проведено порівняльний аналіз результатів дослідження морфології, фазового складу та корозійної тривкості зразків з покриттями Fe(Co)-Mo і Fe-Co-Mo, осаджених на постійному струмі. Поверхня покриттів Fe-Co-Mo має глобулярну структуру з розміром сферодів 2–2,5 μm і має більш рівномірний рельєф порівняно з біметалевими аналогами. Встановлено формування

змішаної аморфно-кристалічної структури тернарного сплаву з утворенням інтерметалідів Fe₇Mo, Fe₇Co, FeCo. Збільшення вмісту молибдену не змінює фазовий склад, проте збільшує ступінь аморфізації сплаву.

2. Сплави Fe-Co-Mo демонструють високу корозійну тривкість в усіх модельних середовищах. Струм корозії тернарних покривів на 1,6 та 1,3 порядку величини менший за показники низьковуглецевої сталі та бінарних Fe(Co)-Mo сплавів відповідно. Опір корозії вкритих сплавом Fe-Co-Mo зразків у 2%-му розчині NaCl становить 3400 Ω·cm², що пояснюється формуванням на поверхні покриву шару оксидів молибдену. Побудовані діаграми «склад – глибинний показник корозії k_h , mm/year» для системи Fe–Co–Mo дозволяють визначити оптимальний склад покривів сплавами Fe(Co)-Mo, Fe-Co-Mo з необхідним опором для захисту від корозії залежно від умов експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Савенко В.І., Висоцька Л.М., Федоренко С.В. Боротьба з корозією металів екологічно чистими засобами / Економіка та держава. – 2018. – № 10. – С. 63–67.
2. Composition and Corrosion Behavior of Iron-Cobalt-Tungsten / M. Ved', N. Sakhnenko, I. Yermolenko et al. // Eurasian Chem.-Technolog. J. – 2018. – Vol. 20, No. 2. – P. 145–152.
3. Kuznetsov V.V., Golyanin K.E., Pshenichkina T.V. Electrodeposition of iron-molybdenum alloy from ammonia-citrate electrolyte / Russ. J. Electrochemistry. – 2012. – Vol. 48, № 11. – P. 1107–1112.
4. Study of the hydrogen evolution reaction on Fe-Mo-P coatings as cathodes for chlorate production / F. Safizadeh, N. Sorour, E. Ghali, G. Houlachi // Intern. J. Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, No. 8. – P. 5455–5463.
5. New electrolytic bath for protective binary FeMo and ternary FeMoP films / E.P. Barbano, F.S. Da Silva, I.A. Carlos. E. Valles // J. of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 695. – P. 319–328.
6. Gomez E., Alcobe X., Valles E. Properties of Co-Mo coatings obtained by electrodeposition at pH 6.6 / J. Solid State Electrochem. – 2004. – Vol. 8. – P. 497–504.
7. Extracting deposition parameters for cobalt–molybdenum alloy from potentiostatic current transients / E. Gomez, Z. Kipervaser, E. Pellicer, E. Valles // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2004. – Vol. 6. – P. 1340–1344.
8. Corrosion Resistance of Electrodeposited Ni-Mo-W Coatings / N. Paulo, S. Casciano, R.L. Benevides et al. // Corroea Int. J. Electrochem. Sci. – 2014. – Vol. 9. – P. 4413–4428.
9. Donten M. Cesiulis H., Stojek Z. Electrodeposition and Properties of Ni-W, Fe-W and Ni-Fe-W Amorphous Alloys. A Comparative Study / Electrochimica Acta. – 2000. – Vol. 45, No. 20. – P. 3389–3396.
10. Electrodeposition of Ni-W, Ni-Mo and Ni-Mo-W alloys from pyrophosphate baths / H. Cesiulis, M. Donten, M. L. Donten et al. // Mater. Sci. – 2001. – Vol. 7, No 4. – P. 237–241.
11. Methods for controlling the composition and morphology of electrodeposited Fe–Mo and Fe-Co-Mo coatings / M.V. Ved', I.Yu. Ermolenko, N.D. Sakhnenko, S.I. Zyubanova, Yu.I. Sachanova // Surf. Eng. Appl. Electrochem. – 2017. – Vol. 53, No. 6. – P. 525–532.
12. Corrosion properties of galvanic Fe-Mo(W), Fe-Mo-W coatings / M.V. Ved', N.D. Sakhnenko, A.V. Karakurkchi, K.D. Pershina, I.Yu. Yermolenko // Func. Mater. – 2019. – Vol. 26, No. 3. – P. 534–540.
13. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. Кристаллическая структура металлов и сплавов. – К. : Наук. думка, 1986. – 284 с.
14. Orazem M.E., Tribollet B. Electrochemical impedance spectroscopy. – N.Y. : J. Willey Inc., 2008.
15. Research into influence of the electrolysis modes on the composition of galvanic Fe-Co-Mo coatings / I. Yermolenko, M. Ved', A. Karakurkchi et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Materials Science. – 2017. – No. 3/12(87). – P. 9–15.
16. Electrodeposition of CoMo and CoMoP alloys from the weakly acidic solutions / H. Cesiulis, N. Tsyntsar, A. Budreika, N. Skridaila // Surf. Eng. Appl. Electrochem. – 2010. – Vol. 46, No. 5. – P. 406–415.
17. M. Ved', I. Yermolenko, T. Nenastina, S. Ziubanova. Influence of alloying elements on corrosion-mechanic properties of multi-component electrolytic alloys // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2018. Спец. вип. № 12, – С.85–89.
18. Nanostructured magnetic films based on iron with refractory metals / I.Yu. Yermolenko, M.V. Ved', N.D. Sakhnenko, I.G. Shipkova, S.I. Zyubanova // JMMM. – 2019. – Vol. 475. – P.115–120.
19. Barsoukov Ed.E., Macdonald J.R. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications. – N.Y. : Wiley, 2005. – 450 p.