ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЛЬВАНІЧНИХ СПЛАВІВ Fe–Mo і Fe–Mo–W

М. В. ВЕДЬ, М. Д. САХНЕНКО, Г. В. КАРАКУРКЧІ, І. Ю. ЄРМОЛЕНКО, Л. П. ФОМІНА

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Розглянуто вплив режимів електроосадження на морфологію, топографію і структуру гальванічних сплавів заліза з молібденом і вольфрамом. Показано, що підвищення корозійного опору покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W у кислому та нейтральному хлоридвмісному середовищах обумовлено як зростанням схильності до пасивації завдяки легувальним компонентам, так і формуванням глобулярної та гомогенної за складом поверхні. Встановлено, що мікротвердість гальванічних сплавів Fe–Mo і Fe–Mo–W у 2–3 рази перевищує показники підкладок з низьколегованої сталі, що пояснюється утворенням аморфної структури. Результати досліджень і трибологічних випробувань свідчать про доцільність використання покривів подвійними і потрійними сплавами заліза для зниження зношування у парах тертя та підвищення корозійного опору і механічної міцності поверхонь, що робить їх перспективними для ремонтних і відновлювальних технологій.

Ключові слова: *гальванічні сплави заліза, легувальні компоненти, вольфрам, молібден, корозійна тривкість, мікротвердість, трибологічні характеристики.*

Ефективне функціонування багатьох галузей промисловості потребує сучасної ремонтної бази, яка повинна забезпечувати високу надійність обладнання, мінімальний термін технічного обслуговування за високої якості виконаних робіт, що передбачає удосконалення існуючих та розвиток новітніх засобів відновлення та поверхневого зміцнення деталей машин і механізмів. На сьогодні широко застосовують технології ремонту шляхом гальванохімічного відновлення зношених поверхонь через нанесення покривів твердим хромом, залізом, нікелем, міддю, цинком тощо [1, 2]. При цьому найперспективнішим вважають електролітичне залізнення [3]. Особливе місце серед тонкошарових матеріалів згаданого призначення посідають композити та електролітичні сплави на основі заліза, яким приділено значну увагу в працях [4–6]. Нівелювати притаманні залізненню низьку адгезію, значну водневу крихкість, недостатню твердість можна завдяки легуванню молібденом і вольфрамом, які надають тонкоплівковим матеріалам корозійної тривкості та опору до найнебезпечніших локальних видів корозії (пітингової, щілинної тощо), а також мікротвердості. Означені технічні параметри забезпечують підвищення ресурсу зношуваних поверхонь та надійність виробам зі сталі та чавуну в цілому. Втім подальшого дослідження потребують питання, пов'язані з керуванням складом, а отже, і властивостями гальванічних сплавів заліза з молібденом і вольфрамом. Тому визначення впливу режимів електролізу на склад, структуру, а відповідно, й корозійний опір і механічні властивості покривів подвійними та потрійними сплавами заліза є актуальною задачею, розв'язанню якої присвячено статтю.

Експериментальна частина. Покриви залізо–молібден і залізо–молібден–вольфрам осаджували із розроблених цитратних електролітів на основі феруму (III)

Контактна особа: М. В. ВЕДЬ, e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua

[7, 8] на попередньо підготовлені зразки зі сталі Ст.20 у гальваностатичному режимі та уніполярним імпульсним струмом амплітудою 3,5…6,0 A/dm^2 за тривалості імпульсу t_{on} $5\cdot10^{-3}$…$1\cdot10^{-2}$ s і паузи t_{off} $1\cdot10^{-2}$…$2\cdot10^{-2}$ s в інтервалі температур 20…25°C [9, 10]. Як аноди використовували пластини із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т зі співвідношенням площі катода до анода 1:3…1:5.

Оцінювали морфологію поверхні електролітичних сплавів з використанням сканівного електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP. Зображення отримували за допомогою реєстрації вторинних електронів шляхом сканування електронним пучком, що дало змогу досліджувати топографію з високими роздільною здатністю і контрастністю за збільшення в 100–5000 разів.

Хімічний склад покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W визначали рентгенофлуоресцентним методом з використанням портативного спектрометра СПРУТ, що має відносне стандартне відхилення 10^{-3}…10^{-2}. Аналізували мінімум у 3 точках з подальшим усередненням отриманих значень. Похибка визначення вмісту компонентів становила ±1 wt.%. Результати рентгенофлуоресцентного аналізу верифікували шляхом реєстрації характеристичного рентгенівського спектра, отриманого за допомогою енергодисперсійного спектрометра INCA Energy 350. Збудження рентгенівського випромінювання здійснювали обробкою зразків пучком електронів з енергією 15 keV. Фазовий склад електрохімічних покривів визначали методом структурного аналізу з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-2.0 у випромінюванні залізного анода. Дифрактограму реєстрували у дискретному режимі з інтервалом 0,1° під час експозиції у кожній точці 15…20 s. Для дослідження використовували зразки, які витримували після формування покривів упродовж 24 h у повітрі. Оцінювали шорсткість поверхні покривів, нанесених на попередньо відполіровану із застосуванням пасти ГОІ сталеву підкладку, контактним методом, використовуючи сканівний зондовий мікроскоп АСМ NT-206 (зонд CSC-37 кантилівер В, латеральна роздільна здатність 3 nm). Сканували поверхню зразків не менш, ніж на трьох ділянках у різних їх частинах для ототожнення результатів дослідження [11].

Досліджували фізико-механічні властивості електролітичних сплавів з використанням мікротвердоміра ПМТ-3 із навантаженням 50 і 100 g та металографічного мікроскопа NEOPHOT-21 (збільшення ×100–500). Для визначення мікротвердості покрив наносили товщиною 30±3 μm.

Тестували корозійну тривкість гальванічних покривів товщиною 6±0,5 μm за експозиції зразків у розчинах різної агресивності і природної аерації (3%-му хлориді натрію та 1 mol/dm^3 сульфаті натрію за додавання сульфатної кислоти до pH 3 і гідроксиду натрію до pH 10). Швидкість корозії підкладки зі сталі і покривів Fe–Mo (Fe–Mo–W) визначали методом поляризаційного опору [12] за результатами аналізу вольтамперних залежностей, отриманих з використанням потенціостата ПІ-50-1.1 з програматором ПР-8 за швидкості розгортки потенціалу 2 mV/s. Як електрод порівняння під час експериментів використовували хлоридсрібний напівелемент ЕВЛ-1М1, який з'єднували з коміркою через сольовий місток, заповнений загущеним агар-агаром розчином хлориду калію. Нижче всі потенціали наведені у перерахунку до нормального водневого електрода. Одержані показники порівнювали з результатами гравіметрії, причому контроль поверхні та маси зразків виконували через 10; 20; 40; 60 days, а оновлювали корозивне середовище під час контрольного зважування зразків. Перед зважуванням продукти корозії видаляли травленням в інгібованому 10%-му розчині хлоридної кислоти впродовж 1 min та фіксували масу зразків на аналітичних вагах з похибкою $1\cdot10^{-4}$ g.

Глибинний показник корозії k_h (mm/year) визначали так:

$$k_h = \frac{m_0 - m_t}{\rho S t} \times 10, \qquad (1)$$

де m_0, m_t – маси зразка до випробувань та після експонування у модельному середовищі і зняття продуктів корозії, відповідно, g; ρ – густина сплаву, $g \cdot cm^{-3}$; S – поверхня зразка, cm^2; t – час випробувань, year.

Результати та їх обговорення. Топографія поверхні електролітичних сплавів молібдену і вольфраму, як встановлено раніше [13], залежить не тільки від складу покривів, а й режиму осадження, і значною мірою обумовлює корозійні та фізико-механічні властивості тонкоплівкових матеріалів. Подвійні та потрійні гальванічні сплави заліза з тугоплавкими металами не стали виключенням. Дослідження топографії та шорсткості поверхні сплавів методом атомної силової мікроскопії (АСМ) узгоджуються з результатами СЕМ та демонструють відмінність рельєфу і розмірів зерен покривів, сформованих постійним струмом (ПСП) (рис. 1), від осаджених уніполярним імпульсним струмом (ПСІ) (рис. 2).

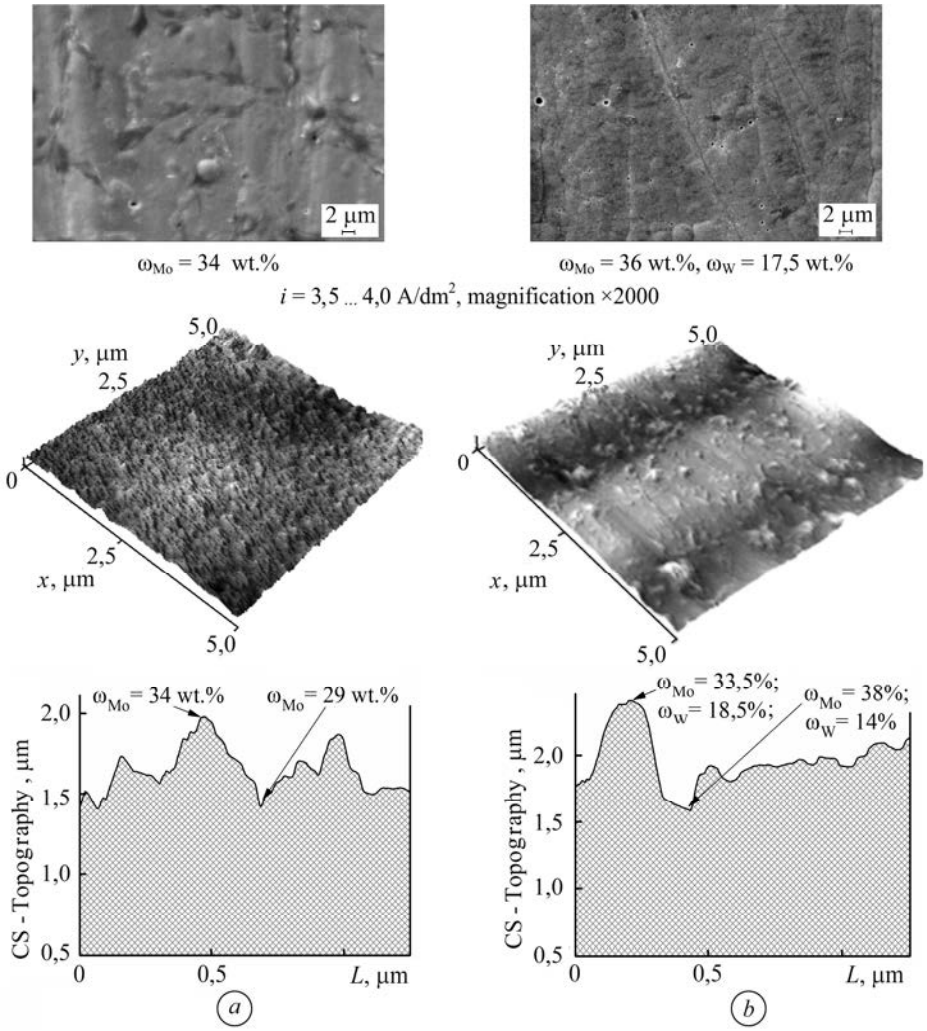

Рис. 1. СЕМ-зображення, 3D-карта поверхні і профіль перетину одержаних у гальваностатичному режимі покривів Fe–Mo (*a*) і Fe–Mo–W (*b*). Площа сканування АСМ 5×5 μm. Товщина покривів 6 μm.

Fig. 1. SEM-images, 3D-surface map and intersection profile for coatings Fe–Mo (*a*) and Fe–Mo–W (*b*) obtained in galvanostatic mode. Scanning area AFM 5×5 μm. Coating thickness 6 μm.

Це пояснюється як особливостями електрокристалізації у нестаціонарних умовах, так і перерозподілом швидкості парціальних електрохімічних і хімічних

реакцій сплавотворення [14]. Як зазначалося раніше [15], формування сплаву включає стадії хімічних перетворень, швидкість яких очікувано менша за електрохімічні, внаслідок чого пауза між імпульсами струму сприяє повнішому перебігу саме хімічних стадій та явищ адсорбції-десорбції, які спряжені в загальній схемі реакцій. У підсумку це забезпечує формування рівномірнішої поверхні, збагаченої тугоплавким компонентом. Бінарні покриви Fe–Mo, осаджені в гальваностатичному режимі, відрізняються гострими виступами та впадинами і суттєвою нерівномірністю складу на різних ділянках рельєфу (рис. 1*a*), тоді як в імпульсному відбувається гомогенізація поверхні за складом і, відповідно, за розмірами зерен (рис. 2*a*). Потрійні ПСП Fe–Mo–W – дрібнокристалічні, складаються з множини гострих зерен з усередненим розміром 70…100 nm (рис. 1*b*), а в імпульсному режимі, як і для бінарних, формується згладжена глобулярніша поверхня з агломератами сферичних зерен розміром 0,2…0,4 μm (рис. 2*b*).

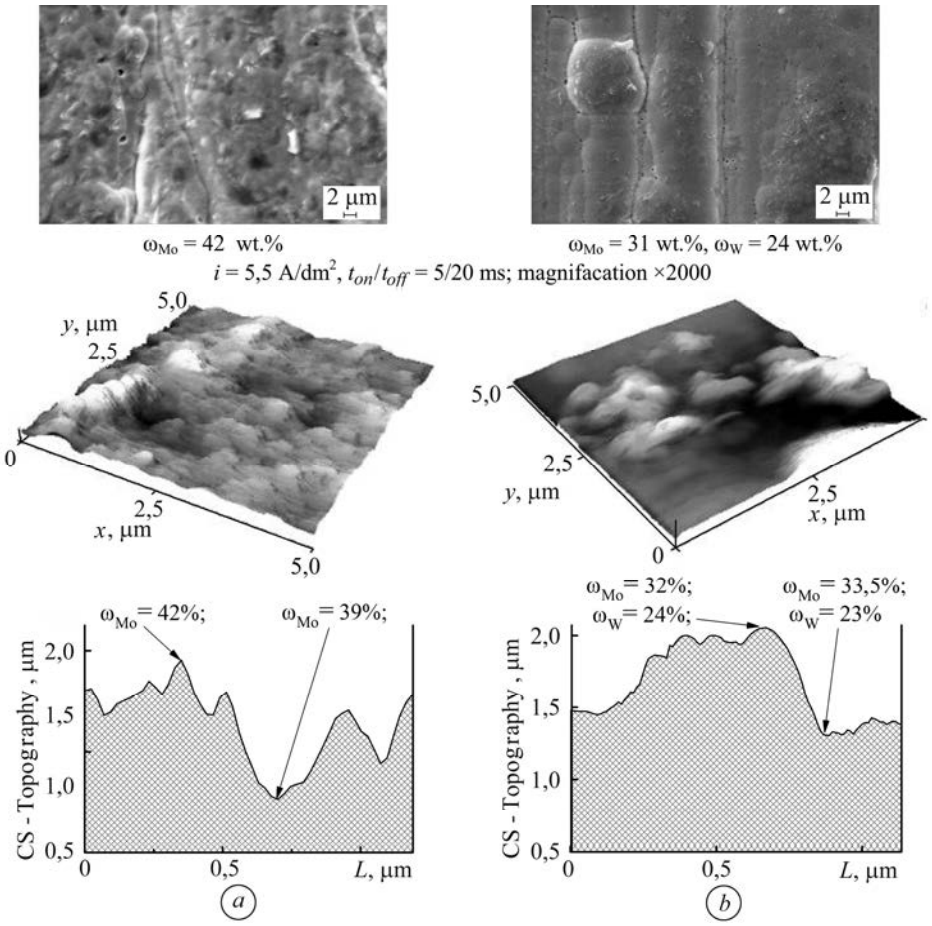

Рис. 2. СЕМ-зображення, 3D-карта поверхні і профіль перетину одержаних в імпульсному режимі покривів Fe–Mo (*a*) і Fe–Mo–W (*b*). Площа сканування АСМ 5×5 μm. Товщина покривів 6 μm.

Fig. 2. SEM-images, 3D-surface map and profile of intersection for coatings Fe–Mo (*a*) and Fe–Mo–W (*b*) obtained in pulsed mode. Scanning area AFM 5×5 μm. Coating thickness 6 μm.

Бінарні ПСІ відрізняються більшою шорсткістю поверхні та розкидом розмірів зерен по перетину (рис. 2*a*) порівняно з потрійними гальванічними сплавами (рис. 2*b*). Крім того, рельєф поверхні покриву Fe–Mo характеризується достатньо гострими виступами і впадинами, тоді як для Fe–Mo–W близькі за розмірами

кристаліти наближаються за формою до сфероїдів. Враховуючи, що виступи поверхні покриву збагачені вольфрамом, можна зробити висновок, що останній сприяє вирівнюванню рельєфу, як це спостерігали і для інших його сплавів [16].

Таким чином, встановлені закономірності формування топографії поверхні покривів сплавами заліза з молібденом і вольфрамом складають підґрунтя для прогнозованого підвищення як корозійного опору, так і мікротвердості покривів порівняно з матеріалом підкладки.

Рентгенівські дифрактограми покривів Fe–Mo (рис. 3*a*) і Fe–Mo–W (рис. 3*b*) із вмістом (в перерахунку на метал) до 40 wt.% Mo у подвійному сплаві та 25 wt.% Mo і 18 wt.% W у потрійному – ідентичні. На них виявлена лише система дифракційних ліній α–Fe та досить широке гало (ширина на половині висоти становить ~10°) на кутах 2θ ~ 57°, що є свідченням аморфної структури, як це раніше спостерігали для гальванічних сплавів вольфраму з кобальтом і нікелем [17].

Аналіз поверхні покривів дозволяє зробити висновок, що кількість мікропор у ПСІ є значно меншою порівняно з ПСП. Це дає підстави вважати, що покриви, одержані в нестаціонарних умовах, матимуть вищі показники хімічного опору в агресивних середовищах та фізико-механічні властивості порівняно зі сплавами, осадженими гальваностатично. Отже, використання імпульсного електролізу дає змогу отримувати рівномірніші бінарні та потрійні покриви з меншою поруватістю, що прогнозовано впливатиме на показники корозійної тривкості та мікротвердості.

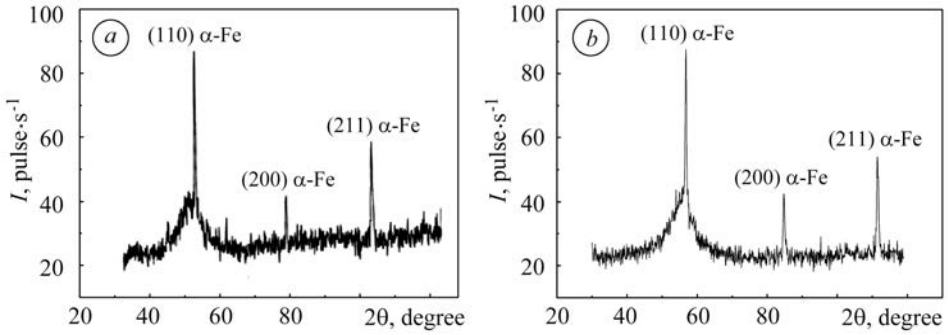

Рис. 3. Рентгенівські дифрактограми покривів Fe–Mo (*a*) та Fe–Mo–W (*b*) на підкладці зі Ст.3.

Fig. 3. X-ray diffraction pattern for Fe–Mo (*a*) and Fe–Mo–W (*b*) coatings on the substrate of steel Ст.3.

Морфологія поверхні покривів тернарним сплавом Fe–Mo–W (рис. 1*b*, 2*b*) суттєво відрізняється від рельєфу поверхні бінарного сплаву Fe–Mo, осадженого на ті ж самі матеріали (рис. 1*a*, 2*a*). На відміну від подвійного сплаву, ПСП Fe–Mo–W мають рівномірнішу гомогенізовану поверхню з незначною кількістю мікропор внаслідок виділення водню. Використання імпульсного струму сприяє утворенню агломератів зерен, які вкривають всю поверхню, що пояснюється включенням вольфраму до складу сплаву завдяки реалізації вищих густин струму на виступах покриву та підтверджується результатами аналізу хімічного складу (рис. 1). Таким чином, аналіз морфології і рельєфу поверхні покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W на підкладках зі сталі дає змогу зробити такі висновки: по-перше, в імпульсному режимі осаджується гомогенніший сплав, що позитивно впливатиме на його термодинамічну стабільність і сприятиме зростанню хімічного опору; по-друге, відбувається електродна реакція відновлення тугоплавких компонентів (Mo, W), що перебігає через проміжну стадію утворення оксидів і за таких умов протікає повніше та з вищим виходом цільового продукту порівняно з електролізом в стаціонарних умовах. Виявлені відмінності у складі, морфології та топогра-

фії поверхні покривів сплавами заліза з молібденом і вольфрамом прогнозовано впливатимуть на їх корозійну поведінку у розчинах різної агресивності.

Дослідження корозійної тривкості покривів багатокомпонентними сплавами Fe–Mo і Fe–Mo–W показали, що у кислому середовищі корозійний процес перебігає переважно з водневою деполяризацією, тоді як в нейтральному та лужному – з кисневою. Як видно із поляризаційних залежностей, у кислому середовищі (рис. 4) потенціали корозії покривів зсуваються у позитивний бік відносно потенціалу підкладки, що свідчить про анодний контроль корозійного процесу, а швидкість корозії зменшується завдяки зростанню схильності до пасивації за присутності легувальних домішок та формуванню щільної плівки кислотних оксидів тугоплавких металів, які забезпечують захисну дію та гальмують руйнування. При цьому корозійна тривкість бінарного сплаву Fe–Mo є дещо вищою порівняно із тернарним, що пояснюється його досконалішою поверхнею.

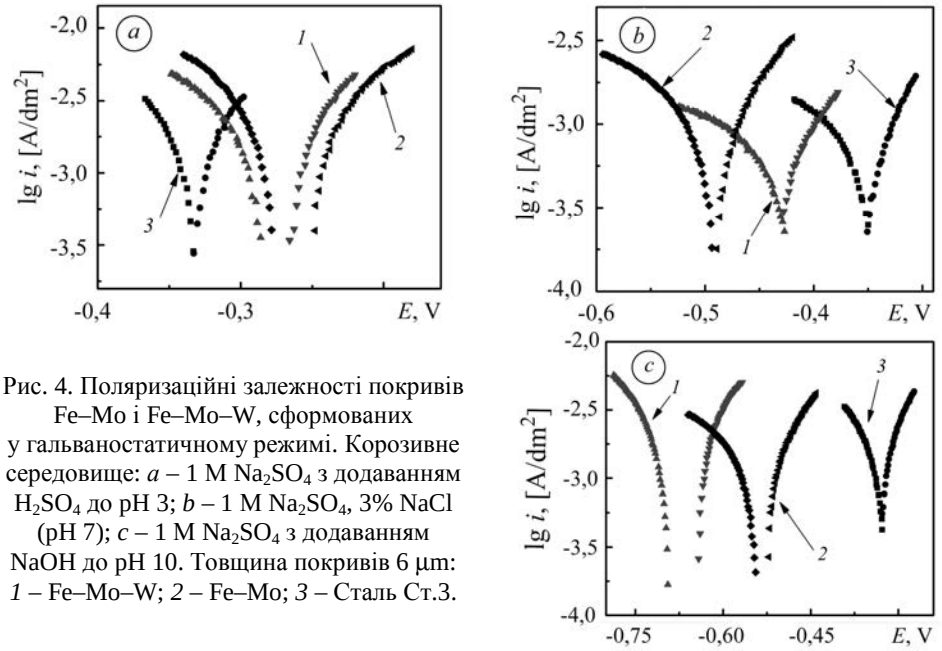

Рис. 4. Поляризаційні залежності покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W, сформованих у гальваностатичному режимі. Корозивне середовище: *a* – 1 M Na_2SO_4 з додаванням H_2SO_4 до pH 3; *b* – 1 M Na_2SO_4, 3% NaCl (pH 7); *c* – 1 M Na_2SO_4 з додаванням NaOH до pH 10. Товщина покривів 6 μm: *1* – Fe–Mo–W; *2* – Fe–Mo; *3* – Сталь Ст.3.

Fig. 4. Polarization curves for Fe–Mo and Fe–Mo–W coatings formed in galvanostatic mode. Corrosive medium: *a* – 1 M Na_2SO_4 with H_2SO_4 to pH 3; *b* – 1 M Na_2SO_4, 3% NaCl (pH 7); *c* – 1 M Na_2SO_4 with NaOH to pH 10. Coating thickness 6 μm: *1* – Fe–Mo–W; *2* – Fe–Mo; *3* – steel Ст.3.

У нейтральному хлоридвмісному середовищі потенціали E_{corr} покривів зсуваються у негативний бік відносно підкладки, що є свідченням катодного контролю корозійного процесу. Причиною гальмування катодної реакції є зміна природи деполяризатора та ускладнення транспорту кисню внаслідок формування плівки оксидів не тільки легувальних компонентів, а й заліза, та стійкість оксидів молібдену навіть за присутності іонів-депасиваторів (Cl^-). Різницю в значеннях потенціалів та струму корозії для бінарних та тернарних гальванічних сплавів (див. таблицю) можна пояснити різною морфологією та топографією поверхні.

Поляризаційні залежності покривів у лужному середовищі (рис. 4*c*) за геометрією та напрямком зсуву потенціалу корозії аналогічні до одержаних у нейтральному хлоридвмісному, що свідчить про катодний контроль корозійного процесу, який відбувається з кисневою деполяризацією. Гальмується катодна реакція завдяки формуванню на поверхні сплавів нерозчинних гідроксидів заліза, що ускладнює доступ кисню. Проте корозійна тривкість у лужному середовищі

значно нижча, ніж у нейтральному, оскільки відбувається хімічне розчинення кислотних оксидів легувальних компонентів.

Показники корозії сталі та покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W

Середовище	Сталь		Покриви товщиною 6 μm							
			Fe–Mo				Fe–Mo–W			
			Режим електролізу							
			стаціонарний		імпульсний		стаціонарний		імпульсний	
	E_{corr}, V	lg i_{corr}, A/dm^2	E_{corr}, V	lg i_{corr}, A/dm^2	E_{corr}, V	lg i_{corr}, A/dm^2	E_{corr}, V	lg i_{corr}, A/dm^2	E_{corr}, V	lg i_{corr}, A/dm^2
pH 3	−0,34	−2,8	−0,26	−3,3	−0,28	−3,5	−0,28	−3,1	−0,29	−3,2
pH 7	−0,35	−3,0	−0,49	−3,2	−0,50	−3,6	−0,43	−3,25	−0,45	−3,3
pH 10	−0,32	−2,8	−0,67	−3,3	−0,7	−3,4	−0,54	−3,0	−0,55	−3,1

Корозійна тривкість покривів, одержаних імпульсним електролізом (див. таблицю), виявляється прогнозовано вищою порівняно зі сформованими за постійного струму. Результати тестування корозійної тривкості покривів поляризаційним методом верифіковані натурними гравіметричними корозійними випробуваннями. Глибинні показники корозії k_h покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W (рис. 5) свідчать, що за варіювання вмісту легувальних компонентів (в перерахунку на метал) до 40 wt.% Mo в бінарному сплаві й до 25 wt.% W з сумарним вмістом тугоплавких компонентів до 58 wt.% у тернарному, покриви можна віднести до категорії “вельми стійкі” та рекомендувати як захисні в агресивних середовищах для низьколегованих сталей.

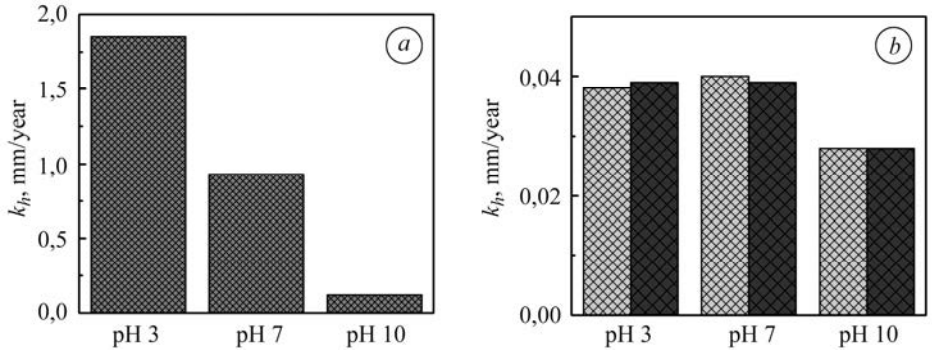

Рис. 5. Залежність глибинного показника корозії від pH середовища для сталі (*a*) та гальванічних сплавів Fe–Mo (▒) і Fe–Mo–W (▬) (*b*). Товщина покривів 6 μm.

Fig. 5. Dependence of deep corrosion rate index on pH for steel (*a*) and galvanic alloys Fe–Mo (▒) and Fe–Mo–W (▬) (*b*). Coating thickness 6 μm.

Для електролітичних покривів на основі заліза визначальними чинниками якості є міцність зчеплення з матеріалом підкладки та мікротвердість. Саме ці показники обумовлюють сфери застосування електролітичних сплавів на основі заліза. Під час дослідження міцності зчеплення покривів встановлено, що сформовані покриви є рівномірними на всій поверхні, мають високу адгезію до основного металу, стійкі під час полірування, згину під кутом 90°, підготовки поперекових зрізів та інших видів механічної обробки. Термообробка при 200°C не впливає на показник адгезії та не призводить до розтріскування покривів.

Електролітичні сплави Fe–Mo і Fe–Mo–W переважають за мікротвердістю основу зі сталі у 2–3 рази (рис. 6), що пояснюється особливостями їх морфології та топографії. Багатокомпонентні покриви, нанесені в імпульсному режимі, мають вищу мікротвердість завдяки більшому вмісту легувальних компонентів,

досконалішому рельєфу поверхні та меншій кількості адсорбованих домішок. Мікротвердість потрійних сплавів Fe–Mo–W закономірно перевершує бінарні Fe–Mo незалежно від режимів електролізу саме завдяки присутності вольфраму в складі сплаву. Отже, аналіз отриманих результатів дає змогу рекомендувати багатокомпонентні покриви сплавами заліза з молібденом і вольфрамом для зміцнення поверхонь із низьколегованих сталей, що дозволить суттєво підвищити їх характеристики в умовах експлуатації.

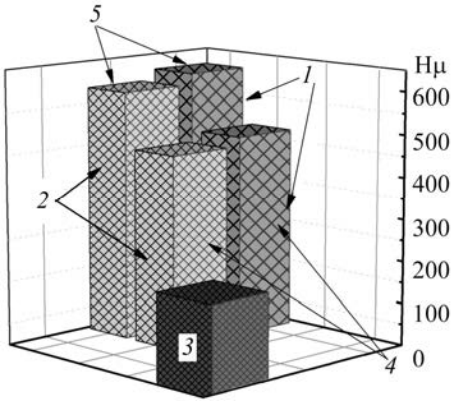

Рис. 6. Мікротвердість покривів Fe–Mo–W (*1*) і Fe–Mo (*2*) на сталі Ст.3 (*3*), одержаних у гальваностатичному (*4*) та імпульсному (*5*) режимах. Товщина покривів 30 μm.

Fig. 6. Microhardness of Fe–Mo–W (*1*) and Fe–Mo (*2*) coatings on steel Ст.3 (*3*) substrate deposited by direct current (*4*) and pulse (*5*) mode. Coating thickness 30 μm.

ВИСНОВКИ

Доведено, що топографія та морфологія поверхні електролітичних покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W залежить від режиму осадження, а застосування імпульсного струму сприяє формуванню глобулярної рівномірнішої поверхні покриву, яка утворена агломератами сферичних зерен розміром 0,2…0,4 μm. Гальванічні сплави заліза з молібденом і вольфрамом незалежно від режиму осадження мають аморфну структуру, що пояснюється високим вмістом легувальних компонентів та є передумовою підвищення фізико-механічних та протикорозійних властивостей сплавів. Корозійна тривкість покривів Fe–Mo і Fe–Mo–W у модельних розчинах різної кислотності суттєво перевищує показники основного металу, що обумовлено зростанням здатності до пасивації і утворенням захисних оксидних плівок за участі легувальних компонентів – молібдену і вольфраму, а також формуванням рівномірнішої і досконалішої структури покриву. За глибинним показником корозії покриви належать до категорії “вельми стійкі”. Показано, що гальванічні багатокомпонентні покриви на основі заліза мають високу адгезію до матеріалу підкладки та вищі фізико-механічні властивості, а за мікротвердістю у 2–3 рази перевершують підкладку із низьколегованої сталі.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрено влияние режимов электроосаждения на морфологию, топографию и структуру гальванических сплавов железа с молибденом и вольфрамом. Показано, что повышение коррозионного сопротивления покрытий Fe–Mo и Fe–Mo–W в кислой и нейтральной хлоридсодержащей средах обусловлено как ростом склонности к пассивации благодаря легирующим компонентам, так и формированием глобулярной и гомогенной по составу поверхности. Установлено, что микротвердость гальванических сплавов Fe–Mo и Fe–Mo–W в 2–3 раза превышает показатели подложек из низколегированной стали, что объясняется образованием аморфной структуры. Результаты исследований и трибологических испытаний свидетельствуют о целесообразности использования покрытий двойными и тройными сплавами железа для снижения износа в парах трения и повышения коррозионного сопротивления и механической прочности поверхностей, что делает их перспективными для ремонтных и восстановительных технологий.

SUMMARY. The influence of the electrodeposition regimes on the morphology, topography and structure of electrolytic alloys of iron with molybdenum and tungsten is discussed. The increase in corrosion resistance of Fe–Mo and Fe–Mo–W coating in acidic and neutral chloride-containing environments due to both rising inclination to passivity by alloying components and the formation of the surface of globular and homogeneous composition is shown. The microhardness of galvanic Fe–Mo and Fe–Mo–W alloys is established to be 2–3 times higher than one

of the mild steel substrate that can be explained by the formation of amorphous structure. Results of research and tribological tests suggest the feasibility of using double and triple iron alloy coatings to reduce wear in the friction pairs and increase corrosion resistance and mechanical durability of surfaces, which makes them promising for repair and restoring technologies.

1. *Escher C. and Henke T.* New trends in thin coatings for sheet metal forming tools // Proc. 6th Int. Tooling Conf.: The use of tool steels: experience and research. – Sweden: Karlstad University, 2002. – Vol. 2. – P. 919–933.
2. *CrN-based* wear resistant hard coatings for machining and forming tools / S. Yang, K. E. Cooke, X. Li, F. McIntosh, and D. G. Teer // J. Physics D: Appl. Physics. – 2009. – **42**, № 10. – P. 104001.
3. *Modern* electroplating / Eds.: M. Schlesinger, M. Paunovich. – Hoboken (New Jersey) : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – P. 309–317.
4. *Modern* Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals / N. Tsyntsaru, H. Cesiulis, M. Donten, J. Sort, E. Pellice, and E. J. Podlaha-Murphy // Surface Eng. and Appl. Electrochemistry. – 2012. – **48**, № 6. – P. 491–520.
5. *Серебровский В. В., Афанасьев Е. А., Реутов Д. С.* Применение электролитических сплавов на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин // Вісник Сумськ. нац. аграрного ун-ту. Сер.: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2012. – Вип. 6. – С. 38–42.
6. *Kuznetsov V. V., Golyanin K. E., and Pshenichkina T. V.* Electrodeposition of Iron–Molybdenum Alloy from Ammonia-Citrate Electrolyte // Russian J. Electrochemistry. – 2012. – **48**, № 11. – P. 1107–1112.
7. *Патент* України № 86680. Електроліт для нанесення покриття сплавом залізо-молібден / М. В. Ведь, Г. В. Каракуркчі, М. Д. Сахненко. – Опубл. 2014; Бюл. № 1.
8. *Электроосаждение* двойных и тройных сплавов железа из цитратных электролитов / А. В. Каракуркчи, М. В. Ведь, Н. Д. Сахненко и др. // Нанотехнологии. Наука и производство. – 2014. – № 3 (30). – С. 24–26.
9. *Патент* України № 94272. Спосіб нанесення покриття залізо-молібден / М. В. Ведь, Г. В. Каракуркчі, М. Д. Сахненко, С. І. Зюбанова. – Опубл. 2014; Бюл. № 21.
10. *Ved M. V., Sakhnenko N. D., and Karakurkchi A. V.* Electroplating and functional properties of Fe–Mo and Fe–Mo–W coatings // Вопросы химии и химической технологии. – 2014. – №. 5–6(98). – С. 53–59.
11. *Снежко Д. В., Рожицкий Н. Н.* Использование сканирующей зондовой микроскопии при разработке электрохемилюминесцентных нанотехнологических сенсоров / Мат. IX Междун. конф. “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии” (12–15 октября 2010). – Бєларусь: Минск, 2012. – С. 156.
12. *Корозійні* та електрохімічні властивості бінарних сплавів кобальту і нікелю / М. В. Ведь, Т. О. Ненастіна, В. В. Штефан, Т. М. Байрачна, М. Д. Сахненко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 3. – С. 89–93.

    (*Ved’ M. V., Nenastina T. O., Bairachna T. M., and Sakhnenko M. D.* Corrosion and electrochemical properties of binary cobalt and nickel alloys // Materials Science. – 2008. – **44**, № 6. – P. 840–843.)
13. *Electrodeposited* Cobalt Alloys as Materials for Energy Technology / M. Glushkova, T. Bairachna, M. Ved, and M. Sakhnenko // MRS Proc. – 2013. – P. 1491.
14. *Ведь М. В., Сахненко Н. Д.* Каталітичні та захисні покриття сплавами і складними оксидами: електрохімічний синтез, прогнозування властивостей. – Харків: Новое слово, 2012. – 288 с.
15. *Electrodeposition* of Iron-Molybdenum Coatings from Citrate Electrolyte / M. V. Ved’, N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurchi, and S. I. Zyubanova // Russian J. Appl. Chem. – 2014. – **87**, № 3. – P. 276−282.
16. *Байрачная Т., Ведь М., Сахненко Н.* Электролитические сплавы вольфрама. Получение и свойства. Монография (e-book). – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 164 p. (https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/ it/book/978-3-659-34663-7/Электролитические сплавы вольфрама).
17. *Structure* and properties of electrolytic Cobalt-Tungsten alloy coatings / M. Ved, M. Sakhnenko, T. Bairachna, T. Tkachenko // Functional Materials. – Харків: Ін-т монокристалів НАН України, 2008. – **15**, № 4. – P. 613–617.

Одержано 27.05.2015