

ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ ВИСОКОШВИДКІСНИМ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ FeMoNiCrB, ЩО АМОРФІЗУЄТЬСЯ

Н.В. Вігілянська¹, Ц. Сендеровскі², К.В. Янцевич¹, О. І. Духота³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Варшавський політехнічний університет. 00661, Польща, м. Варшава, пл. Політехніки, 1

³Національний авіаційний університет. 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1

Методом високошвидкісного газополуменового напилення з використанням механічно-легованих порошків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, з добавками сполук (Ti, Cr)C та FeTiO₃ одержані покриття з аморфно-кристалічною гетерофазною структурою. Покриття систем FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ мають щільну дрібнозернисту структуру з пористістю 2,4 та 1,2 % та твердістю 5510 ± 250 та 4410 ± 190 МПа, відповідно. Проведено дослідження корозійної тривкості та стійкості до фретинг-корозії розроблених покриттів. Показано, що використання в якості матеріалів для напилення композиційних порошків на основі сплаву FeMoNiCrB з додаванням сполук (Ti, Cr)C та FeTiO₃ дозволяє підвищити захисні властивості покриттів, порівняно з покриттям зі сплаву FeMoNiCrB. Встановлено, що у випадку нанесення композиційних покриттів FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ на сталеву основу Ст3 корозійна тривкість зразків у розчинах 3%-го NaCl, 10%-го H₂SO₄ та 10%-го KOH підвищується у 7,3, 9; 3,9, 5,3 та 9,5, 9,7 разів, відповідно. Покриття FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ володіють досить високою стійкістю до фретинг-корозії, яка в 4,6 та 5,8 разів перевищує стійкість титанового сплаву ОТ4-1. Отримані результати свідчать про перспективність використання високошвидкісного газополуменового напилення розроблених покриттів FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ для зміцнення-відновлення поверхонь, що працюють в агресивних середовищах та підвержених фретинг-корозії. Бібліогр. 26, табл. 6, рис. 4.

Ключові слова: високошвидкісне газополуменове напилення, аморфна фаза, аморфний сплав на основі заліза, композиційне покриття, корозійна тривкість, фретинг-корозія

Вступ. У порівнянні з кристалічними матеріалами матеріали з аморфною структурою внаслідок відсутності границь зерен і дислокацій мають такі властивості, як висока міцність, висока межа пружності, зносостійкість і корозійна стійкість [1]. Серед систем аморфних металевих матеріалів сплави на основі заліза представляють великий інтерес для використання в промисловості не тільки через їх властивості, а й через відносно низьку вартість і доступність матеріалу [2]. Крім того, знижений вміст або відсутність Ni і Co в сплавах на основі заліза, що аморфізуються, робить використання цих сплавів економічно більш вигідним, ніж стандартних матеріалів на основі нікелю і кобальту (таких як сплави, що самофлюсуються, Ni–Cr–B–Si, стелітні сплави і т. д.).

Застосування Fe-сплавів, що аморфізуються, в якості матеріалів для газотермічного напилення покриттів дозволяє формувати на поверхні деталей шари з аморфною і нанокристалічною структурою, які володіють захисними властивостями. Для формування покриттів на основі аморфних Fe-сплавів застосовують методи плазмового [3, 4], надзвукового плазмового [5], електродугового

[6], детонаційного [7, 8], високошвидкісного газополуменового (High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), High Velocity Air Fuel (HVOF)) [9, 10] напилення. Покриття, що одержуються, характеризуються поєднанням твердості, корозійної стійкості і зносостійкості, здатності поглинати нейтрони та гідрофобністю, що робить їх досить перспективними для застосування в різних областях (військовій, атомній, нафтогазовій та інших галузях промисловості) [11].

Захисні властивості можуть бути додатково покращені шляхом додавання в покриття невеликої (до 30 об. %) кількості керамічних частинок (наприклад, WC/Co, B₄C, TiN, Al₂O₃, ZrO₂ та ін.). Композиційні покриття систем FeSiBCrMo–TiN, FeCSiBPCrMoAl–B₄C, FeCrMoCB–WC/Co, отримані методами плазмового та HVOF напилення, мають не тільки більш високу твердість, але й самозмащуваність, демонструючи підвищену зносостійкість у 2...5 разів порівняно з однофазним покриттям [12–14]. Показано [15], що введення 20 мас. % ZrO₂ у плазмове покриття на базі FeCrMoCB в 2 рази підвищує зносостійкість покриття в умовах тертя-ковзання; в плазмове покриття на базі

Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Сендеровскі Ц. – <https://orcid.org/0000-0002-0331-3702>,

Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, Духота О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8091-1717>

© Н.В. Вігілянська, Ц. Сендеровскі, К.В. Янцевич, О.І. Духота, 2023

сплаву FeCrNbBSi – теплозахисні властивості [16]. Введення 20 мас. % Al_2O_3 до покриття сплаву FeCrMoCBY, напиленого методом HVOF, підвищує зносостійкість та корозійну стійкість покриттів у середовищі 3,5 % NaCl у 2...3 рази [17].

Метою роботи було дослідження корозійної стійкості та стійкості до фретинг-корозії композиційних покриттів, отриманих методом високошвидкісного газополуменевого напилення (ВШГПН) порошків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, з додаванням до їх складу зміцнюючих сполук (Ti, Cr)C та FeTiO_3 .

Матеріали та методики досліджень. В якості матеріалів для ВШГПН покриттів використовували порошок сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, і композиційні керметні порошки на базі сплаву FeMoNiCrB зі зміцнюючими добавками подвійного карбіду (Ti, Cr)C і титанату заліза FeTiO_3 . Вибір зміцнюючих компонентів досліджуваних покриттів ґрунтувався на їх корозійній стійкості та трибологічних характеристиках [18, 19]. Композиційні порошки одержували шляхом механічного легування у планетарному млині «Активатор 2SL» сумішей порошків, що складаються зі сплаву FeMoNiCrB та добавки однієї зі сполук (Ti,Cr)C (твердий розчин 24 об. % Cr_3C_2 у TiC) та FeTiO_3 (ільменіт). Вміст зміцнюючого компонента в порошковій суміші вибрано на підставі рекомендацій з розробки керметних покриттів на основі аморфних Fe-сплавів, згідно з якими оптимальним вмістом зміцнюючих фаз в керметних покриттях є 10...30 об. % [12–17, 20]. В результаті механічного легування (МЛ) були сформовані аморфно-нанокристалічні керметні порошки на основі твердого пересиченого розчину Fe(Ni, Cr) з добавками зміцнюючих фаз. Детальний опис процесу механічного легування порошків цих складів наведено у роботі [21]. У табл. 1 наведено характеристики порошків, використаних у даній роботі для ВШГПН-покриттів.

Високошвидкісне газополуменеве напилення покриттів проводили за допомогою установки УВШГПН-М1 з використанням наступних технологічних параметрів [22]: тиск пропан-бутану – 4 атм, тиск кисню – 7 атм, тиск повітря – 6 атм, тиск азоту – 5 атм, дистанція напилення 120 мм. Для підвищення міцності зчеплення зі сталеву основою керметні покриття FeMoNiCrB– (Ti, Cr)

С та FeMoNiCrB– FeTiO_3 напилювали на підшар NiCr (товщина 50...100 мкм), який було нанесено методом електродугового напилення.

Для дослідження структури покриттів використовували методи металографії (мікроскоп NEOPHOT 32, оснащений приставкою для цифрової зйомки марки SIGETA); мікродюрOMETРИЧНИЙ аналіз покриттів проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 50 г. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) виконували на дифрактометрі ДРОН-3 в $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з графітовим монохроматором при кроковому переміщенні $0,1^\circ$ та часом експозиції в кожній точці 4с з подальшою комп’ютерною обробкою отриманих цифрових даних. Ідентифікацію фаз проводили з використанням бази даних ASTM. Пористість покриттів визначали на металографічних шліфах методом аналізу зображення (стандарт) ASTM B-276 за допомогою програми «Image-Pro Plus».

Корозійну тривкість покриттів, нанесених на зразки зі Ст3 завтовшки 500 мкм, досліджували потенціостатичним методом на потенціостаті П-5827М при швидкості розгортки 2 мВ/с в розчинах 10% H_2SO_4 , 3% NaCl та у 10% KOH. Дані електроліти були обрані для дослідження впливу природи агресивного середовища (різного виду аніонів) на корозійні процеси. В якості електроду порівняння застосовували хлоридсрібний електрод, допоміжним електродом слугувала платина. За експериментальними значеннями були побудовані катодні і анодні поляризаційні криві в координатах: $E = f(\lg i)$, де E_c – потенціал корозії, В; i_c – струм, А/см² [23, 24]. Струм корозії і потенціал корозії визначали графічним методом по поляризаційним кривим шляхом екстраполяції тафелевих ділянок катодної та анодної кривих до $E = E_c$. Використовуючи значення струмів корозії був розрахований масометричний (K_B) та глибинний (K_n) показники корозії за формулами [23]:

$$K_B = \frac{i \cdot A \cdot 1000}{n \cdot F},$$

де K_B – ваговий показник корозії, г/м²·год; i – струм корозії, А/см²; A – атомна вага металу, г/моль, (для заліза та сталі $A = 56$); n – валентність іона металу, який перейшов в розчин (для заліза $n = 2$); F – число Фарадея, 26,8 А·год/моль;

Таблиця 1. Характеристика порошків для високошвидкісного газополуменевого напилення покриттів

Склад, мас. %	Розмір частинок, мкм	Метод отримання	Фазовий склад
FeMoNiCrB (36,2Fe–29,9Mo–23,6Ni–7,6Cr–2,7B)	<40	Розпилення розплаву азотом	Твердий розчин Fe(Ni, Cr), Fe_2B , Mo_2FeB_2 , CrB_2
77FeMoNiCrB–23(Ti, Cr)C	<40	МЛ 1,5 год	Твердий розчин Fe(Ni, Cr), Mo_2FeB_2 , (Ti, Cr)C, TiC, Cr_3C_2 , аморфна фаза
75FeMoNiCrB–10FeTiO ₃	<40	МЛ 1,5 год	Твердий розчин Fe(Ni, Cr), Mo_2FeB_2 , FeTiO_3 , аморфна фаза

$$K_{\Pi} = K_{\text{в}} \cdot \frac{8,76}{\rho},$$

де K_{Π} – глибинний показник корозії, мм/рік; ρ – густина металу, г/см³ ($\rho_{\text{Fe}} = 7,85$ г/см³); 8,76 – перекладний коефіцієнт для переходу від вагового показника корозії до розрахунку на 1 год до глибинного показника до 1 року, розрахований з кількості годин на рік (24 год 365 = 8760 год) і розділений на 1000.

Захисну дію покриттів оцінювали за допомогою коефіцієнту гальмування швидкості корозії γ :

$$\gamma = \frac{K_{\text{в}}(\text{с})}{K_{\text{в}}(\Pi)},$$

де γ – коефіцієнт гальмування корозії; $K_{\text{в}}(\text{с})$ і $K_{\text{в}}(\Pi)$ – ваговий показник швидкості корозії сталі та сталі з покриттями в корозійних середовищах (г/м²·год).

Ступінь захисту від корозії $Z(\%)$ розраховували за формулою:

$$Z = \frac{K_{\text{в}}(\text{с}) - K_{\text{в}}(\Pi)}{K_{\text{в}}(\text{с})} \cdot 100\%.$$

Для порівняльної характеристики корозійної стійкості була використана десятибальна шкала оцінки, заснована на використанні глибинного показника корозії (K_{Π}) [23].

Випробування з оцінювання порівняльної зносостійкості досліджуваних покриттів проводилось в умовах фретинг-корозійного зношування.

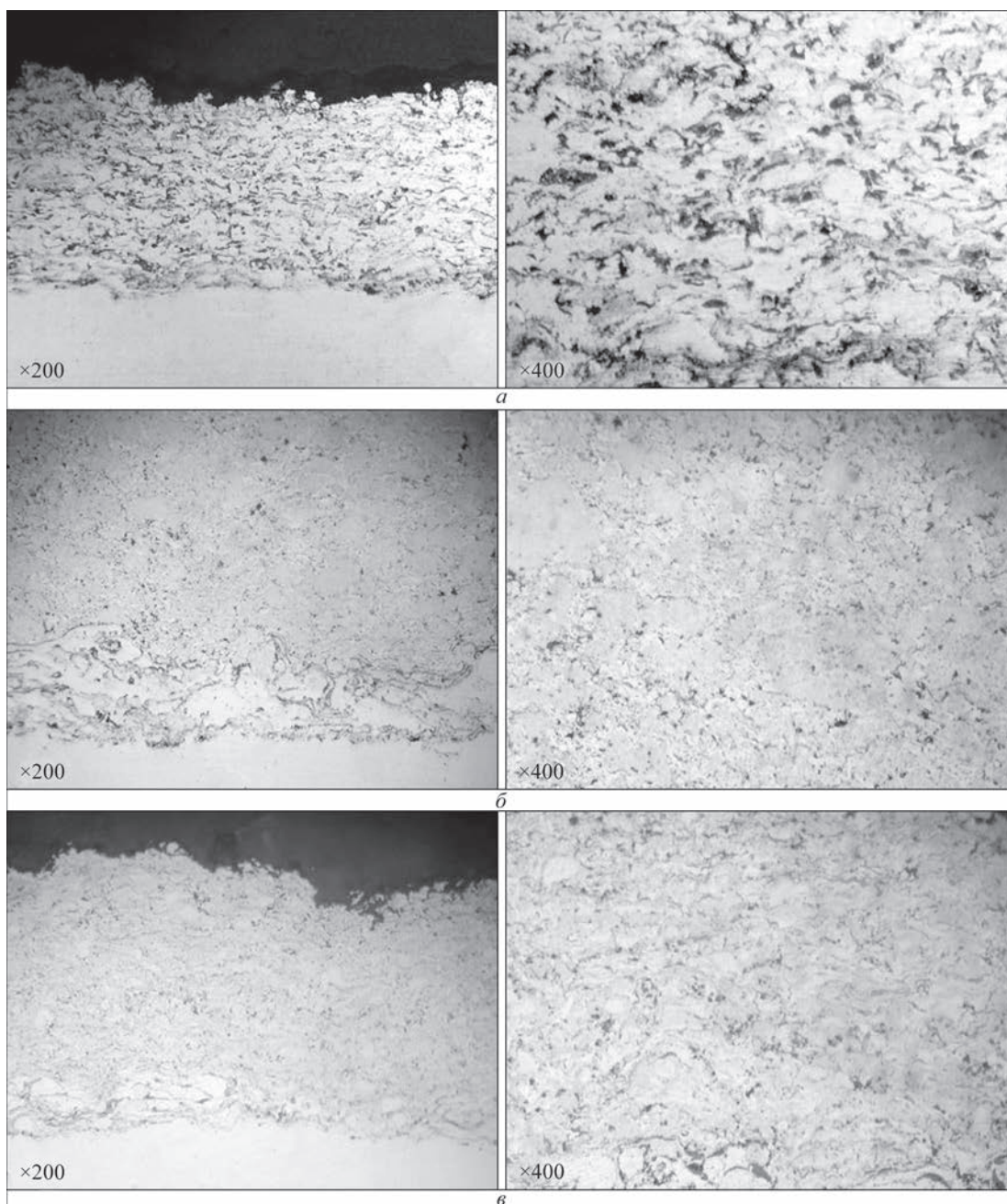


Рис. 1. Мікроструктура покриттів, отриманих методом ВШГПН: а – FeNiCrMoB; б – FeNiCrMoB – (Ti, Cr)C; в – FeNiCrMoB–FeTiO₃

Товщина покриттів складала 500 мкм, після напилення було проведено механічну обробку із збереженням товщини 300 мкм, включаючи підшар.

Умови віброциклічного навантаження: амплітуда відносного вібраційного переміщення зразків $A = 120$ мкм, питоме навантаження на контактні поверхні зразків $P = 20$ МПа, частота коливань $f = 25$ Гц, кількість циклів вібропереміщень зразків (база випробувань) $N = 5 \cdot 10^5$ цикл. Зразки випробувались на повітрі за температури $T = 293$ К. У кожній парі тертя нерухомими були зразки з досліджуваними покриттями, рухомими – контрзразки із сталі 45, загартованої на твердість $HRC \sim 48 \dots 50$ од. Базовим варіантом для порівняння зносостійкості слугував титановий сплав ОТ4-1. Після випробування визначався знос зразків лінійним методом.

Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження мікроструктури ВШГПН-покриттів (рис. 1) показало, що при напиленні як порошків сплаву FeMoNiCrB, так і композиційних порошків FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C та FeNiCrMoB-FeTiO₃ формуються щільні, однорідні по товщині покриття. Пористість та мікротвердість покриттів FeMoNiCrB, FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C та FeNiCrMoB-FeTiO₃ складає 3,4, 2,4, 1,2 % та 4390, 5510 та 4410 МПа, відповідно. Покриття мають типову для ВШГПН дрібнозернисту структуру, яка сформована з повністю розплавлених частинок, що розтеклися і кристалізувалися, та частково деформованих частинок, що мають овальну та близьку до сферичної форми. На границях частково деформованих частинок спостерігаються прошарки темно-сірого кольору, що є ре-

зультатом взаємодії в процесі напилення частинок порошку з киснем та утворенням оксидних шарів.

Рентгенофазовим аналізом (рис. 2) встановлено, що в результаті ВШГПН порошків на основі сплаву FeMoNiCrB формуються багатофазні покриття з аморфно-кристалічною структурою.

Фазовий склад отриманих покриттів дещо відрізняється від фазового складу вихідних порошків. При напиленні кристалічного порошку FeNiCrMoB відбувається його часткова аморфізація, про що свідчить наявність на рентгенограмі гало від аморфної фази (рис. 2, а). При напиленні композиційних порошків відбувається взаємодія вихідного сплаву FeNiCrMoB зі зміцнюючими добавками з утворенням фази Fe₂Ti в покритті FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C (рис. 2, б) та фази NiTi в покритті FeNiCrMoB-FeTiO₃ (рис. 2, в). В усіх покриттях присутні оксиди заліза, причому в композиційних покриттях FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-FeTiO₃ вони наявні в невеликій кількості. Слід зазначити, що за рахунок утворення в покритті FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C твердих фаз карбонітриду титану воно має дещо більшу (на 1100 МПа) мікротвердість в порівнянні з покриттям FeNiCrMoB.

Характеристику ВШГПН-покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB наведено в табл. 2.

Дослідження кінетики електродних потенціалів покриттів на основі FeMoNiCrB у досліджених електролітах дозволило встановити, що значення стаціонарного потенціалу стабілізується через 15...40 хв. На поверхні покриттів потенціал корозії зсувається у позитивну сторону, в порівнянні зі зразком Ст3, струм корозії знижується на один-два

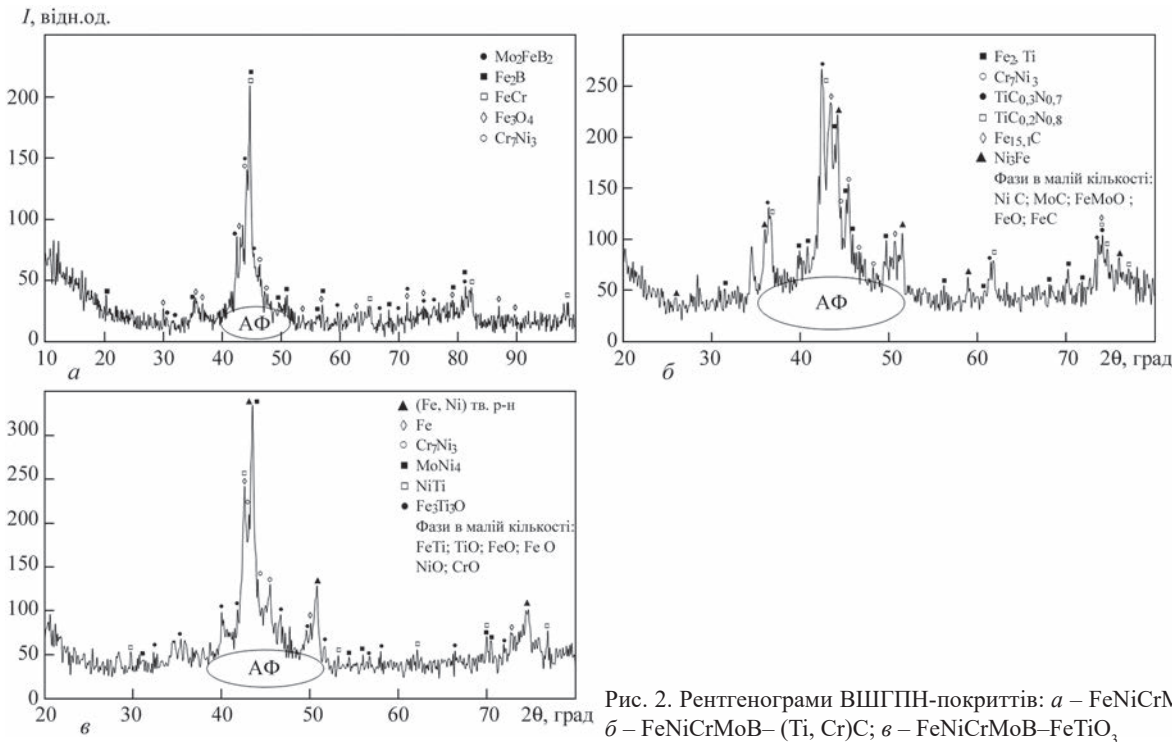


Рис. 2. Рентгенограми ВШГПН-покриттів: а – FeNiCrMoB; б – FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C; в – FeNiCrMoB-FeTiO₃

Таблиця 2. Характеристика покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB, отриманих методом високошвидкісного газополуменового напilenня

Матеріал покриття	Пористість, %	Мікротвердість $HV_{0,05}$, МПа	Фазовий склад
FeMoNiCrB	$3,4 \pm 0,7$	4390 ± 290	Mo_2FeB_2 ; Fe_2B ; $FeCr$; Fe_3O_4 ; Cr_7Ni_3 , аморфна фаза
FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C	$2,4 \pm 0,4$	5510 ± 250	Fe_2Ti ; Cr_7Ni_3 ; $TiC_{0,3}N_{0,7}$; $TiC_{0,2}N_{0,8}$; $Fe_{1,5}C$; Ni_3Fe ; аморфна фаза; фази в малій кількості: Ni_3C ; MoC ; $FeMoO_4$; FeO ; FeC_8
FeMoNiCrB-FeTiO ₃	$1,2 \pm 0,3$	4410 ± 190	твердий розчин (Fe, Ni); Cr_7Ni_3 ; $MoNi_4$; $NiTi$; Fe_3Ti_3O ; аморфна фаза; фази в малій кількості: $FeTi$; TiO ; FeO ; Fe_3O_4 ; NiO ; CrO

порядки, відбувається гальмування як катодного, так і анодного процесу (рис. 3). У 10%-му розчині H_2SO_4 відбувається зниження перенапруги виділення водню на поверхні покриттів, у 3%-му розчині NaCl та у 10%-му розчині КОН відбувається гальмування процесу відновлення кисню (рис. 3). Незалежно від складу покриття у розчині 3%-го NaCl катодні та анодні поляризаційні криві мають практично однаковий хід, у 10%-му розчині H_2SO_4 та у 10%-му розчині КОН на анодних поляризаційних кривих з'являються ділянки пасивного стану. На поверхні зразків з покриттями після експонування в цих розчинах відсутні пітинги та виразки. Після очищення поверхні темніють, що свідчить про перебіг анодного розчинення.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що для всіх досліджених покриттів струм корозії в 3%-му NaCl (pH 7) та у 10 % КОН (pH 11) є на порядок вищим, ніж у розчині 10% H_2SO_4 (pH 2-3), тобто швидкість корозії корелює з pH розчину. Також на корозійну тривкість впливає зміна характеру деполяризації корозійного процесу (від водневої у розчині сульфатної кислоти до

переважно кисневої у розчині 3%-го хлориду натрію та розчині луку).

Електрохімічні дослідження у 3%-му розчині NaCl показали, що на зразках з покриттями струм корозії знижується на порядок, відносно зразків СтЗ без покриття (з $2 \cdot 10^{-5}$ для сталі до $2,9 \dots 6,5 \cdot 10^{-6}$ А/см² для покриттів) (табл. 3). Відсутність пасивації в 3%-му NaCl може бути обумовлена тим, що цей розчин належить до агресивного з високим вмістом Cl^- , в присутності якого відбувається поступове витіснення кисню з захисної плівки на поверхні електроду та неможливістю формування пасивної плівки. У 10%-му розчині H_2SO_4 на поверхні покриттів, відносно зразків СтЗ без покриття, відбувається зміщення потенціалу корозії в область пасивного стану, струм корозії знижується на два порядки (з $3 \cdot 10^{-3}$ для сталі до $2,5 \dots 5,8 \cdot 10^{-5}$ А/см² для покриттів). Дослідження покриттів у 10%-му розчині КОН показали, що відносно зразків СтЗ без покриття, струм корозії знижується на один порядок (з $4 \cdot 10^{-5}$ для сталі до $4 \dots 5 \cdot 10^{-6}$ А/см² для покриттів).

Встановлено, що при використанні композиційних порошків з добавками (Ti, Cr)C та FeTiO₃

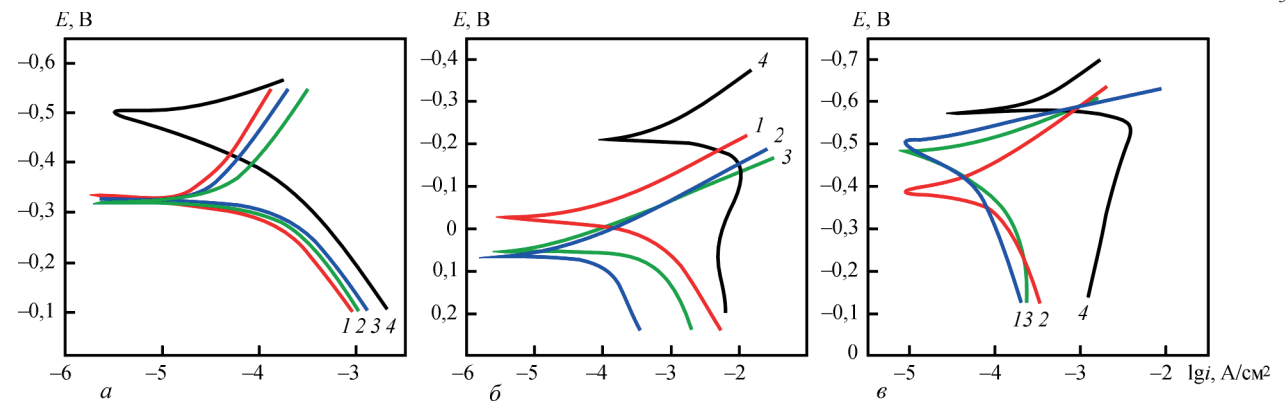


Рис. 3. Поляризаційні криві ВШГПН-покриттів у 3%-му розчині NaCl (а), у 10%-му розчині H_2SO_4 (б), у 10%-му розчині КОН (в) (1 – FeMoNiCrB; 2 – FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C; 3 – FeMoNiCrB-FeTiO₃; 4 – СтЗ)

Таблиця 3. Результати електрохімічних випробувань ВШГПН-покриттів

Покриття	3 % NaCl			10 % H_2SO_4			10 % КОН		
	E_{cp} , В	E_c , В	i_c , А/см ²	E_{cp} , В	E_c , В	i_c , А/см ²	E_{cp} , В	E_c , В	i_c , А/см ²
FeMoNiCrB	-0,43	-0,44	$6,5 \cdot 10^{-4}$	-0,2	-0,18	$5,8 \cdot 10^{-5}$	-0,44	-0,4	$5 \cdot 10^{-4}$
FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C	-0,38	-0,34	$4,3 \cdot 10^{-6}$	-0,06	-0,04	$4,2 \cdot 10^{-5}$	-0,50	-0,48	$4,2 \cdot 10^{-6}$
FeMoNiCrB-FeTiO ₃	-0,34	-0,3	$2,9 \cdot 10^{-6}$	-0,06	-0,05	$2,5 \cdot 10^{-5}$	-0,56	-0,53	$4 \cdot 10^{-6}$
Зразок СтЗ без покриття	-0,52	-0,5	$2 \cdot 10^{-5}$	-0,24	-0,22	$3 \cdot 10^{-3}$	-0,6	-0,58	$4 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 4. Корозійна тривкість ВШГПН-покриттів у 3%-му розчині NaCl

Покриття	K_v , г/м ² год	K_n , мм/рік	γ	Z, %	Бал корозійної тривкості
FeMoNiCrB	0,052	0,05	5,8	82,7	4
FeMoNiCrB-(TiCr)C	0,036	0,04	7,3	86,3	4
FeMoNiCrB-FeTiO ₃	0,031	0,032	9,0	89,2	4
Ст3 без покриття	—	0,293	—	—	6

Таблиця 5. Корозійна тривкість ВШГПН-покриттів у 10%-му розчині H₂SO₄

Покриття	K_v , г/м ² год	K_n , мм/рік	γ	Z, %	Бал корозійної тривкості
FeMoNiCrB	0,18	0,16	3,6	72,2	6
FeMoNiCrB-(TiCr)C	0,16	0,15	3,9	74,3	6
FeMoNiCrB-FeTiO ₃	0,12	0,11	5,3	81,1	6
Ст3 без покриття	—	0,59	—	—	7

Таблиця 6. Корозійна тривкість ВШГПН-покриттів у 10%-му розчині КОН

Покриття	K_v , г/м ² год	K_n , мм/рік	γ	Z, %	Бал корозійної тривкості
FeMoNiCrB	0,05	0,056	8,2	87,8	4
FeMoNiCrB-(TiCr)C	0,044	0,048	9,5	89,4	4
FeMoNiCrB-FeTiO ₃	0,042	0,047	9,7	89,6	4
Ст3 без покриття	—	0,34	—	—	6

корозійна тривкість в досліджуваних розчинах підвищується в 1,2...2,3 рази відносно покриття зі сплаву FeMoNiCrB. Найбільшу корозійну тривкість має покриття FeMoNiCrB-FeTiO₃, що може бути пов'язано з його низькою пористістю та наявністю в фазовому складі сполук NiTi та складного оксиду Fe₃Ti₃O, які підвищують корозійну тривкість (табл. 2).

Значення струмів корозії, обчислених з поляризаційних кривих, дозволили розрахувати ваговий і глибинний показники корозії (табл. 4–6).

За десятибальною шкалою корозійної тривкості [24] аморфні покриття на основі сплаву FeMoNiCrB у 3 %-му розчині NaCl та у 10%-му розчині КОН мають бал стійкості 4 та відносяться до групи «стійких», 10%-му розчині H₂SO₄ мають бал стійкості 6 та відносяться до групи «знижено стійких».

Проведені електрохімічні випробування показали, що при нанесенні композиційних покриттів на основі FeMoNiCrB швидкість корозії Ст3 у 3%-му розчині NaCl, у 10%-му розчині H₂SO₄ та у 10%-му розчині КОН знижується в 7,3... 9, 3,9... 5,3 та у 9,5...9,7 разів, відповідно; ступінь захисту при цьому складає 86,3... 89,2, 74,3...81,1 та 89,4... 89,6 %, відповідно.

Результати проведених досліджень ВШГПН-покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB свідчать про їх корозійну тривкість у 3%-му розчині NaCl на рівні сплаву ВТ-6 ($i_c \sim 10^{-6}$ А/см²) [25].

Результати досліджень покриттів на стійкість до фретинг-корозії (рис. 4) показали, що зносостійкість ВШГПН-покриттів FeMoNiCrB, FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C та FeNiCrMoB-FeTiO₃ пе-

ревищує зносостійкість титанового сплаву ОТ4-1 в 3,3, 4,6 та 5,8 разів, відповідно. Така висока зносостійкість покриттів досягається завдяки специфічності структури покриттів гетерогенного типу, де тверді включення рівномірно розподілені у м'якішій в'язкій матриці. В умовах фретинг-корозії та під дією високих питомих навантажень в процесі експлуатації пластикна матриця легко переноситься на сполучену поверхню, захищає її від пошкоджень і сприяє релаксації напружень [26]. Наявність дисперсних твердих включень, що сприймають основне силове навантаження, зумовлює підвищення опору контактуючих матеріалів втомному руйнуванню.

Згідно з результатами проведених досліджень, найбільш фретингостійким є композиційне покриття FeNiCrMoB-FeTiO₃, а ряди за зростанням стійкості ВШГПН-покриттів мають вигляд: FeMoNiCrB → FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C → FeNiCrMoB-FeTiO₃. Така закономірність, вочевидь, пов'язана з відносним вмістом пор в покриттях, оскільки пористість знижує стійкість по-

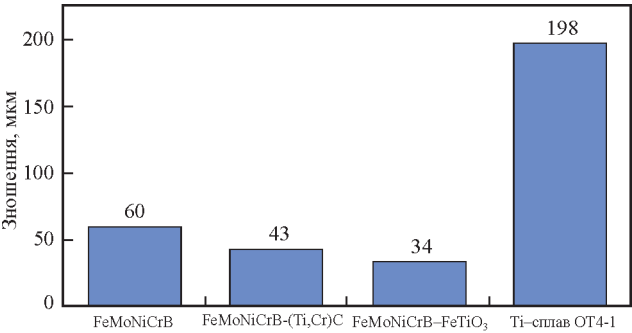


Рис. 4. Результати досліджень ВШГПН-покриттів на стійкість до фретинг-корозії

криттів в умовах тертя без мастильних матеріалів з огляду на те, що пори є концентраторами напружень та зародками мікротріщин.

Виходячи з проведених досліджень захисних властивостей отримані композиційні ВШГПН-покриття на основі сплаву FeNiCrMoB, що аморфізується, можуть бути запропоновані для підвищення стійкості деталей машин і механізмів, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ та схильних до руйнування при фретинг-корозії, зокрема, для захисту титанових деталей авіаційної техніки.

Висновки

Методом високошвидкісного газополуменевого напилення з використанням механічно-легованих порошків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, з добавками (Ti, Cr)C та FeTiO₃ сполук отримані щільні гетерогенні покриття, пористість яких не перевищує 3 %. Результати фазового аналізу покриттів FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ свідчать про їх аморфно-кристалічну структуру.

Корозійна тривкість газотермічних композиційних покриттів на базі сплаву FeMoNiCrB виміряна у розчинах 3%-го NaCl, 10%-го H₂SO₄ та у 10%-го KOH, за показниками глибинної корозії перевищує тривкість сталі Ст3 у 7,3... 9; 3,9... 5,3 та 9,5...9,7 разів, відповідно, з показниками 0,032...0,04; 0,11...0,15 та 0,047...0,048 мм/рік. За показником струму корозії отримані аморфні покриття мають корозійну тривкість на рівні титанового сплаву BT-6 ($i_c \sim 10^{-6}$ А/см²).

Визначення стійкості покриттів до фретинг-корозії показало, що зносостійкість керметних покриттів FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ перевищує стійкість титанового сплаву OT4-1 в 4,6 та 5,8 разів, відповідно, що робить ці покриття перспективними при використанні для зміцнення деталей вузлів авіаційної техніки, які підвержені фретинг-корозії.

Список літератури/References

1. Stachurski, Z.H. (2011) On Structure and Properties of Amorphous Materials. *Materials*, 4(9), 1564–1598. Doi:10.3390/ma4091564
2. Hashimoto, K. (2011) What we have learned from studies on chemical properties of amorphous alloys. *Applied Surface Science*, 257(19), 8141–8150. Doi:10.1016/j.apusc.2010.12.142
3. An, Y., Hou, G., Chen, J. et al. (2014) Microstructure and tribological properties of iron-based metallic glass coatings prepared by atmospheric plasma spraying. *Vacuum*, 107, 132–140. Doi:10.1016/j.vacuum.2014.04.021
4. Yugeswaran, S., Kobayashi, A. (2014) Metallic glass coatings fabricated by gas tunnel type plasma spraying. *Vacuum*, 110, 177–182. Doi:10.1016/j.vacuum.2014.04.016
5. Li, G., Gan, Y., Liu, C. et al. (2020) Corrosion and Wear Resistance of Fe-Based Amorphous Coatings. *Coatings*, 10(1), 73. Doi:10.3390/coatings10010073
6. Lin, J., Wang, Z., Lin, P. et al. (2014) Microstructure and cavitation erosion behavior of FeNiCrBSiNbW coating prepared by twin wires arc spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 240, 432–436. Doi:10.1016/j.surfcoat.2013.12.07
7. Артемчук В.В. (2011) Структура та властивості аморфних детонаційних покриттів на основі заліза. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, 36, 39–44. DOI:10.15802/stp2011/8707
8. Artemchuk, V.V. (2011) Structure and properties of Fe-based amorphous detonation coatings. *Visnyk Dnipro. Nats. Un-tu Zalizn. Transportu*, 36, 39–44. DOI:10.15802/stp2011/8707
9. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Цимбаліста Т.В. та ін. (2021). Отримання і властивості детонаційних покриттів на основі аморфізованого сплаву FeMoNiCrB з введенням зміцнюючих фаз. *Автоматичне зварювання*, 12, 38–45 <https://doi.org/10.37434/as2021.12.05>
10. Borysov, Yu.S., Borysova, A.L., Tsymbalista, T.V. et al. (2021) Producing and properties of detonation coatings based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with addition of strengthening phases. *The Paton Welding J.*, 12, 29–35. <https://doi.org/10.37434/as2021.12.05>
11. Ma, H.R., Chen, X.Y., Li, J.W. et al. (2016) Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*, 33(1), 56–62. Doi:10.1080/02670844.2016.1176718
12. Wang, G., Huang, Z., Xiao, P., Zhu, X. (2016) Spraying of Fe-based amorphous coating with high corrosion resistance by HVAE. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 34–38. doi:10.1016/j.jmapro.2016.01.009
13. Liu, L., Zhang, C. (2014) Fe-based amorphous coatings: Structures and properties. *Thin Solid Films*, 561, 70–86. doi:10.1016/j.tsf.2013.08.029
14. Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Suresh, K., Subramanian, B. (2013) Characterization of gas tunnel type plasma sprayed TiN reinforced Fe-based metallic glass coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 551, 168–175. doi:10.1016/j.jallcom.2012.09.111
15. Yoon, S., Kim, J., Kim, B.D., Lee, C. (2010) Tribological behavior of B₄C reinforced Fe-base bulk metallic glass composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 1962–1968. Doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.078
16. Terajima, T., Takeuchi, F., Nakata, K. et al. (2010) Composite coating containing WC/12Co cermet and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying. *Journal of Alloys and Compounds*, 504, S288–S291. Doi:10.1016/j.jallcom.2010.03.209
17. Chu, Z., Yang, Y., Chen, X. et al. (2016) Characterization and tribology performance of Fe-based metallic glassy composite coatings fabricated by gas multiple-tunnel plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 292, 44–48. Doi:10.1016/j.surfcoat.2016.03.024
18. Zhou, Z., Han, F.-X., Yao, H.-H. et al. (2021) Novel Fe-Based Amorphous Composite Coating with a Unique Interfacial Layer Improving Thermal Barrier Application. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(19), 23057–23066. Doi:10.1021/acsami.0c22868
19. Yasir, M., Zhang, C., Wang, W. et al. (2015) Wear behaviors of Fe-based amorphous composite coatings reinforced by Al₂O₃ particles in air and in NaCl solution. *Materials & Design*, 88, 207–213. Doi:10.1016/j.matdes.2015.08.142
20. Umanskii, A.P., Konoval, V.P., Panasyuk, A.D. et al. (2007) Plasma coatings of (TiCrC)–(FeCr) composite powder alloys: Structure and properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 46(3–4), 133–138. Doi:10.1007/s11106-007-0022-8
21. Abdou, M.I., Ayad, M.I., Diab, A.S.M. et al. (2017) Influence of surface modified ilmenite/melamine formaldehyde composite on the anti-corrosion and mechanical properties of conventional polyamine cured epoxy for internal coating of gas and oil transmission pipelines. *Progress in Organic Coatings*, 113, 1–14. Doi:10.1016/j.porgcoat.2017.08.003
22. Surzhenkov, A., Antonov, M., Goljandin, D. et al. (2013) Sliding wear of TiC–NiMo and Cr₃C₂–Ni cermet particles reinforced FeCrSiB matrix HVOF sprayed coatings. *Estonian Journal of Engineering*, 19(3), 203–211. <https://doi.org/10.3176/eng.2013.3.03>
23. Borysov, Yu.S., Borysova, A.L., Burlachenko, O.M. (2021) Composite powders based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds for thermal spraying

- of coatings. *The Paton Welding J.*, **11**, 38–47. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.11.07>
22. Borysov, Yu.S., Vihilianska, N.V., Demianov, I.A. et al. (2022) Studies of coatings produced by high-velocity oxy-fuel spraying using cermet powder based on FeMoNiCrB amorphizing alloy. *The Paton Welding J.*, **2**, 33–36. <https://doi.org/10.37434/as2022.02.05>
 23. Похмурський В.І., Хома М.С. (2008) *Корозійна втома металів та сплавів*. Львів, СПОЛОМ.
 - Pokhmurskyi, V.I., Khoma, M.S. (2008) *Corrosion fatigue of metals and alloys*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
 24. Алімов В.І., Дурягіна З.А. (2012) *Корозія та захист металів від корозії*. Донецьк, Східний видавничий дім.
 - Alimov, V.I., Duryagina, Z.A. (2012) *Corrosion and corrosion protection of metals*. Donetsk, Skhidnyi Vydavnychy Dim [in Ukrainian].
 25. Томашов Н.Д., Чернова Г.П., Корниенко Л.П. (1982) *Коррозионная стойкость титана в технологических средах химической промышленности*. Москва, НИИ ТЭХИМ.
 - Tomashov, N.D., Chernova, G.P., Kornienko, L.P. (1982) Corrosion resistance of titanium in technological environments of chemical industry. Moscow, NII Tekhim [in Russian].
 26. Hariharasakthisudhan, P., Rajan, B.S., Sathickbasha, K. (2020) Inspiration of reinforcements, manufacturing methods, and microstructural changes on wear behavior of metal matrix composites – a recent review. *Materials Research Express*, **7**(1), 012006. Doi:10.1088/2053-1591/ab6918

PROPERTIES OF COATINGS PRODUCED BY HVOF-SPRAYING OF COMPOSITE POWDERS BASED ON AMORPHIZED FeMoNiCrB ALLOY

N.V. Vigilanska¹, C. Senderowski², K.V. Yantsevych¹, O.I. Dukhota³

¹ E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

² Warsaw University of Technology, Pl. Politechniki 1, 00661, Warsaw, Poland

³ National Aviation University, 1, Lubomir Husar Ave, 03058 Kyiv, Ukraine

Applying the method of HVOF-spraying with the use of mechanically-alloyed powders based on the amorphized FeMoNiCrB alloy with the additions of (Ti, Cr)C and FeTiO₃ compounds, the coatings with amorphous crystalline heterophase structure were produced. The coatings of FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ systems have a dense fine-grained structure with a porosity of 2.4 and 1.2 % and a hardness of 5510 ± 250 and 4410 ± 190 MPa, respectively. The study of corrosion resistance and resistance to fretting corrosion of the developed coatings was conducted. It is shown that the use of composite powders based on FeMoNiCrB alloy with the addition of (Ti, Cr)C and FeTiO₃ compounds as spraying materials allows increasing the protective properties of the coatings compared to the coating of FeMoNiCrB alloy. It was found, that in the case of producing composite FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ coatings on the steel base St3, the corrosion resistance of the specimens in the solutions of 3% NaCl, 10% H₂SO₄ and 10% KOH is increased by 7.3, 9; 3.9, 5.3 and 9.5, 9.7 times, respectively. FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ coatings have a fairly high resistance to fretting corrosion, which is 4.6 and 5.8 times higher than the resistance of titanium OT4-1 alloy. The obtained results indicate the prospect of using HVOF-spraying of the developed FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ coatings to strengthen and restore surfaces operating in aggressive environments and those subjected to fretting corrosion. 26 Ref., 6 Tabl., 4 Fig.

Keywords: HVOF-spraying, amorphous phase, amorphous iron-based alloy, composition coating, corrosion resistance, fretting corrosion

Надійшла до редакції 03.05.2023



ГЕНЕРАЛЬНА АСАМБЛЕЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ ЗВАРЮВАННЯ

16 травня в Амстердамі на базі Nederlands Instituut voor Lastechniek пройшла 62-га Генеральна Асамблея Європейської федерації зварювання (EFW). Традиційно на порядку денному стояли питання розвитку та вдосконалення системи навчання, атестації та сертифікації персоналу, задіяного у зварюванні та споріднених процесах. Робочі групи прозвітували про розробку та оновлення програм навчання для ряду виробничих технологій. При цьому зацікавленим виробничим підприємствам EFW пропонує не просто рекомендації стосовно тематик лекційних і практичних занять, а комплекс, який включає кваліфікаційні характеристики персоналу відповідно до Європейської рамки кваліфікацій, набір гармонізованих екзаменів, рекомендації для навчальних центрів. На додачу, такі програми пропонуються не тільки для навчання безпосередньо операторів або зварників, а й для дизайнерів продукції, координаторів робіт та осіб, відповідальних за контроль і забезпечення якості.

Окрім нових програм звітували й про вдосконалення уже існуючих, зокрема, найпопулярнішої серед представників промисловості програми навчання Європейських інженерів зі зварювання. Наразі поставлено задачу повністю переробити дану програму з чотирьох великих блоків на дрібніші модулі компетентностей, подібно до програми навчання персоналу адитивним технологіям. Такий підхід дозволяє зробити навчання більш гнучким і уникнути необхідності повторного проходження одних і тих самих тем при підвищенні рівня кваліфікації або при отриманні кваліфікації із суміжної категорії персоналу.

Також представники Європейської федерації зварювання відзвітували про результати робіт з атестації та сертифікації персоналу у 2022 р. та про поточний стан виконання проєктів.