

ОТРИМАННЯ І ВЛАСТИВОСТІ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ АМОРФІЗОВАНОГО СПЛАВУ FeMoNiCrB З ВВЕДЕННЯМ ЗМІЦНЮЮЧИХ ФАЗ

Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Т.В. Цимбаліста, А.І. Кільдій, К.В. Янцевич, З.Г. Іпатова

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

Досліджено структуру та властивості аморфізуючих композиційних детонаційних покриттів на основі FeMoNiCrB-сплаву. Для нанесення покриттів були використані композиційні порошки FeMoNiCrB + ZrB₂, FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, FeMoNiCrB + FeTiO₃, отримані з суміші порошків композицій методом механічного легування. Встановлено, що в результаті детонаційного наплення всіх складів порошків сформовані покриття мають щільну, ламелярну, багатофазну структуру. Склад покриттів включає тверді розчини Fe(Ni,Cr), бориди Mo₂FeB₂ і Fe₂B, дисперсні включення легуючих добавок (ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃) і оксидів (ZrO₂ і FeCr₂O₄ або Fe₂O₃, або Fe₃O₄), а також аморфну фазу, кількість якої в структурі покриттів в результаті процесу детонаційного наплення зростає. Приведені показники мікротвердості, корозійної стійкості, довговічності та зносостійкості композиційних детонаційних покриттів. Бібліогр. 12, табл. 6, рис. 4.

Ключові слова: детонаційне наплення, композиційні порошки, аморфізуючий залізний сплав, борид цирконію, карбід титану-хрому, титанат заліза, покриття, корозійна стійкість, зносостійкість

Комплекс особливих фізико-хімічних і механічних характеристик, виявлених у матеріалів з аморфною структурою, зумовив широкі перспективи їх практичного використання для розробки захисних покриттів, що працюють в умовах підвищеного зношення та корозії, а також для отримання покриттів зі спеціальними властивостями (магнітними, резистивними, радіаційностійкими та ін.) [1–3].

Одним із способів отримання покриттів з аморфною структурою є газотермічне наплення покриттів [3].

Важливою перевагою газотермічного наплення (ГТН) при отриманні металевих матеріалів з аморфною структурою (ММА) перед іншими способами (спінінгування розплаву, екструзія розплаву, отримання тонких шарів ММА з використанням лазера, випаровування в вакуумі, магнетронного розпилення та ін.), які дозволяють отримувати фольги, стрічки товщиною не більше 10...150 мкм, є можливість формування шарів матеріалу покриття з аморфною структурою товщиною до кілька мм. Основа технології ГТН покриттів з аморфною структурою полягає в забезпеченні швидкості охолодження частинок розплаву матеріалу, що напильюється, в момент формування покриття на поверхні основи не нижче величини критичного значення, що є характеристикою кожного аморфізуючого сплаву. Основна маса таких сплавів на Ni-, Fe- та Co-основі має таку характеристику в межах 10⁵...10⁶ К/с [1, 3], що можливо забезпечити в умовах ГТН відповідним підбором розмірів частинок,

що напильюються, параметрів процесу наплення та системи охолодження виробу, на який напильюється покриття, під час використання практично всіх методів ГТН (газополуменового, плазмового і детонаційного). Однак при газополуменовому і плазмовому напленні прямий вплив високотемпературного газового струменя на напильовану поверхню вимагає розробки спеціальних умов охолодження зони наплення, щоб уникнути зниження швидкості падіння температури частинок, що напильюються, нижче необхідної. У зв'язку з цим умови детонаційного наплення є більш сприятливими для забезпечення необхідних для формування аморфного стану структури напильованого покриття швидкостей охолодження розплаву частинок, що напильюються. З іншого боку більш високі швидкості частинок розплаву при детонаційному напленні призводять при їх ударі об поверхню основи до формування деформованих частинок-сплетів меншої товщини, що забезпечує більш високі швидкості охолодження напильованого матеріалу і сприяє аморфізації матеріалу покриття.

Накопичений досвід детонаційного наплення аморфних покриттів показав перспективність і ефективність їх практичного застосування для відновлення деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) (Fe₆₉B₁₅C₁₀Si₆, Fe₇₀Cr₁₀B₂₀, Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇), зміцнення деталей металорізальних верстатів і штампового інструмента (Fe₆₁B₃₇C₂, Fe₆₇Ti₇B₂₄C, Ni₃B), для захисту від зносу та корозії деталей хімічного машинобудування (Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇, Ni₄₀Ti₄₀Si₂₀) [3]. Одним з напрямків подальшого

Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Борисова А.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-7376-3370>, Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>, Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, Іпатова З.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-2209-408X>
© Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Т.В. Цимбаліста, А.І. Кільдій, К.В. Янцевич, З.Г. Іпатова, 2021

розвитку технологій детонаційного напилення покриттів з аморфізованою структурою, яка може привести до підвищення їх службових властивостей і розширення областей застосування, є розробка детонаційних композиційних покриттів на базі сплавів з аморфною структурою.

Метою цієї роботи було вивчення процесу формування структури та визначення властивостей детонаційних покриттів з композиційних порошків на базі сплаву FeMoNiCrB з добавками ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃, що одержуються методом механічного легування.

Об'єкти дослідження і методика експерименту. Для детонаційного напилення покриттів використовували композиційні порошки, отримані методом механічного легування з суміші порошку аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з 30 об. % тугоплавких сполук ZrB₂, (Ti, Cr)C і FeTiO₃. Методика отримання композиційних порошків детально описана в роботі [4], а їх характеристика представлена в табл. 1.

Детонаційне напилення покриттів проводили на установці «Перун-С» з використанням в якості детонуючої суміші пропан-бутану (50 % C₃H₈ + 50 % C₄H₁₀) з киснем у співвідношенні 1:3 з додаванням повітря. В якості транспортуючого газу використовували повітря (табл. 2). Дистанція напилення була постійною – 110 мм, частота проходження циклів становила 6,6 с⁻¹.

Для дослідження структури та фазового складу покриттів використовували методи металографії (мікроскоп «Неофот-32», оснащений приставкою для цифрової зйомки); рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) виконували на дифрактометрі ДРОН-3 в CuKα-випромінюванні з графітовим монохроматором при кроковому переміщенні 0,1°

Таблиця 1. Характеристика вихідних порошків

Порошок	Розмір частинок, мкм	Густина ρ, г/см ³	Мікротвердість, МПа	Фазовий склад
FeMoNiCrB, (Fe – 36,2; Mo – 29,9; Ni – 23,6; Cr – 7,6; B – 2,7)	63...100	7,84	6170±1170	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , Fe ₂ B, Cr ₂ B
FeMoNiCrB + ZrB ₂	<80	7,42	6020±1280	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , ZrB ₂ , АФ
FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C	<40	7,283	5650±1100	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , (Ti,Cr)C Cr ₃ C ₂ , АФ
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	<80	7,52	5050±660	Тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , FeTiO ₃ , АФ

Таблиця 2. Режими напилення детонаційних покриттів

Порошок	Витрата детонуючої суміші, м ³ /год			Витрата транспортуючого газу (повітря), м ³ /год
	Пропан-бутан C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀	Кисень	Повітря	
FeMoNiCrB	0,5	1,55	0,5	0,65
FeMoNiCrB + ZrB ₂	0,5	1,55	0,9	0,35
FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C	0,5	1,55	0,9	0,35
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	0,5	1,55	0,9	0,35

та часом експозиції в кожній точці 4 с з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих цифрових даних. Ідентифікацію фаз проводили з використанням бази даних ASTM.

Корозійну стійкість детонаційних покриттів в розчинах 10 % H₂SO₄, 3 % NaCl, 5 % NaOH досліджували потенціостатичним методом на потенціостаті П-5827 М при швидкості розгортки 2 мВ/с з використанням спеціально сконструйованої притисної комірки, що забезпечує односторонній доступ електроліту до покриття і не вимагає захисту неробочих поверхонь. В якості електрода порівняння застосовували хлорсрібний електрод, заповнений насиченим розчином хлористого калію, а допоміжним електродом слугувала платина. Підготовку зразків перед початком корозійних випробувань проводили згідно ГОСТ Р 9.905-2007 [5].

За експериментальними значеннями були побудовані катодні і анодні поляризаційні криві в координатах

$$E_c = f(\lg i_c),$$

де E_c – потенціал корозії, В; i_c – густина струму, А/см² [6, 7].

Швидкість і потенціал корозії покриттів визначали графічним методом по поляризаційним кривим шляхом екстраполяції тафелевих ділянок катодних і анодних кривих до $E = E_c$.

Використовуючи значення струмів корозії, визначених з поляризаційних кривих, був розрахований ваговий і глибинний показник корозії за формулами [6]:

$$K_b = \frac{iA \cdot 1000}{nF},$$

де K_b – ваговий показник корозії, г/м²·год; i – густина струму, А/см²; A – атомна вага металу, г/моль;

n – валентність іона металу, який перейшов у розчин; F – число Фарадея (26,8 А·год/моль).

$$K_n = K_b \frac{8,76}{\rho}$$

де K_n – глибинний показник корозії, мм/рік; ρ – густина металу, 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.

Для порівняльної характеристики корозійної стійкості була використана десятибальна шкала оцінки (ГОСТ 13819-69), заснована на використанні глибинного показника корозії (K_n) [6].

Зносостійкість покриттів досліджували в умовах абразивного зношування при терті о нежорстко закріпленій абразив (ГОСТ 23.208-79) [8]¹⁾. В якості матеріалу абразиву для випробувань застосовували пісок SiO₂ з твердістю 11 ГПа і карбід В₄С з мікротвердістю 45 ГПа; розмір частинок порошоків 250...300 мкм.

Показник зносостійкості покриття оцінювали за втратою маси зразка після проведення досліду з точністю 0,0001 г. Для кожного типу покриття досліджували три зразки.

Відносну зносостійкість (K_i) оцінювали за формулою [8]

$$K_i = \frac{G_e}{G_i} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e}$$

де ρ_e , ρ_i – густини, а G_e , G_i – втрата маси еталонного і досліджуваного матеріалів, г.

В якості еталонного зразка використовували сталь 30ХГСА з твердістю H_B 212...248.

Результати експерименту та обговорення.

Дослідження мікроструктури детонаційних покриттів

(рис. 1) показало, що при напиленні як порошоків аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB, так і композиційних порошоків формуються щільні, однорідні по товщині покриття з ламелярною структурою, де спостерігається чергування світлих і темніших ламелей. Значення мікротвердості як темних, так і світлих ламелей змінюються в широких межах (табл. 3), при цьому в цілому можна відзначити її більш високі значення для темних ламелей, в яких, напевно, зосереджені оксидні включення. Якщо порівнювати усереднені значення мікротвердості покриттів в залежності від складу, то можна відзначити більш високі їх значення для КП з карбідом (Ti, Cr)C в порівнянні з боридами ZrB₂ і оксидом FeTiO₃. Така ж закономірність має місце в разі вихідних КП (табл. 1). Однак мікротвердість напилених покриттів виявлялася нижче, ніж вихідних порошоків. Причина такої різниці цілком ймовірно полягає у відмінності вмісту в них аморфної фази [9].

Рентгеноструктурний фазовий аналіз детонаційних покриттів свідчить про те, що при напиленні КП всіх складів формується аморфно-кристалічна структура, про що свідчать великі області «галло» на рентгенограмах (рис. 2).

Дослідження кінетики електродних потенціалів детонаційних покриттів (рис. 3) показало, що їх значення стабілізуються через 15...40 хв після занурення зразків в електроліт. Так, у 3%-му розчині NaCl при введенні добавок ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ відбувається зсув потенціалу корозії (E_c) в більш позитивну сторону від -0,35 до -0,28 В та гальмування катодної реакції виділення водню. Якщо в разі покриттів з порошку FeMoNiCrB струми корозії знаходяться в межах 4·10⁻⁶ А/см², то при введенні добавок вони практично для всіх

РСФА	Склад	H_μ^* , МПа	Характеристика структури
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , Fe ₂ B, Fe ₂ O ₃	FeMoNiCrB	4855±1023	Щільна однорідна структура з ледь помітною ламелярністю і невеликою кількістю темних дрібних (мабуть оксидних) включень (рис. 1, а)
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , ZrB ₂ , Fe ₂ B, ZrO ₂ T, FeCr ₂ O ₄	FeMoNiCrB + ZrB ₂	3830±570	Щільна тонколамелярна структура зі світлими і темно-сірими ламелями, що чергуються, мікротвердість яких відрізняється незначно (відповідно 3270...4500 та 3040...5590 МПа) (рис. 1, б)
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , (Ti, Cr)C, Fe ₂ B, Fe ₂ O ₃	FeMoNiCrB +(Ti, Cr)C	4450±700	Щільна ламелярна структура зі світлими включеннями округлої форми, мікротвердість яких змінюється в межах від 3800 до 5700 МПа (рис. 1, в)
АФ, тв. р-н Fe(Ni,Cr), Mo ₂ FeB ₂ , FeTiO ₃ , Fe ₂ B, Fe ₃ O ₄	FeMoNiCrB + FeTiO ₃	3750±620	Щільна тонколамелярна структура зі світлими ($H_\mu = 2220...4350$ МПа) темносірими ($H_\mu = 3000...3980$ МПа) ламелями з великою кількістю як світлих, так і темно-сірих включень (рис. 1, г)

¹⁾Дослідження були виконані за участю канд. техн. наук Лабунця В.Ф.

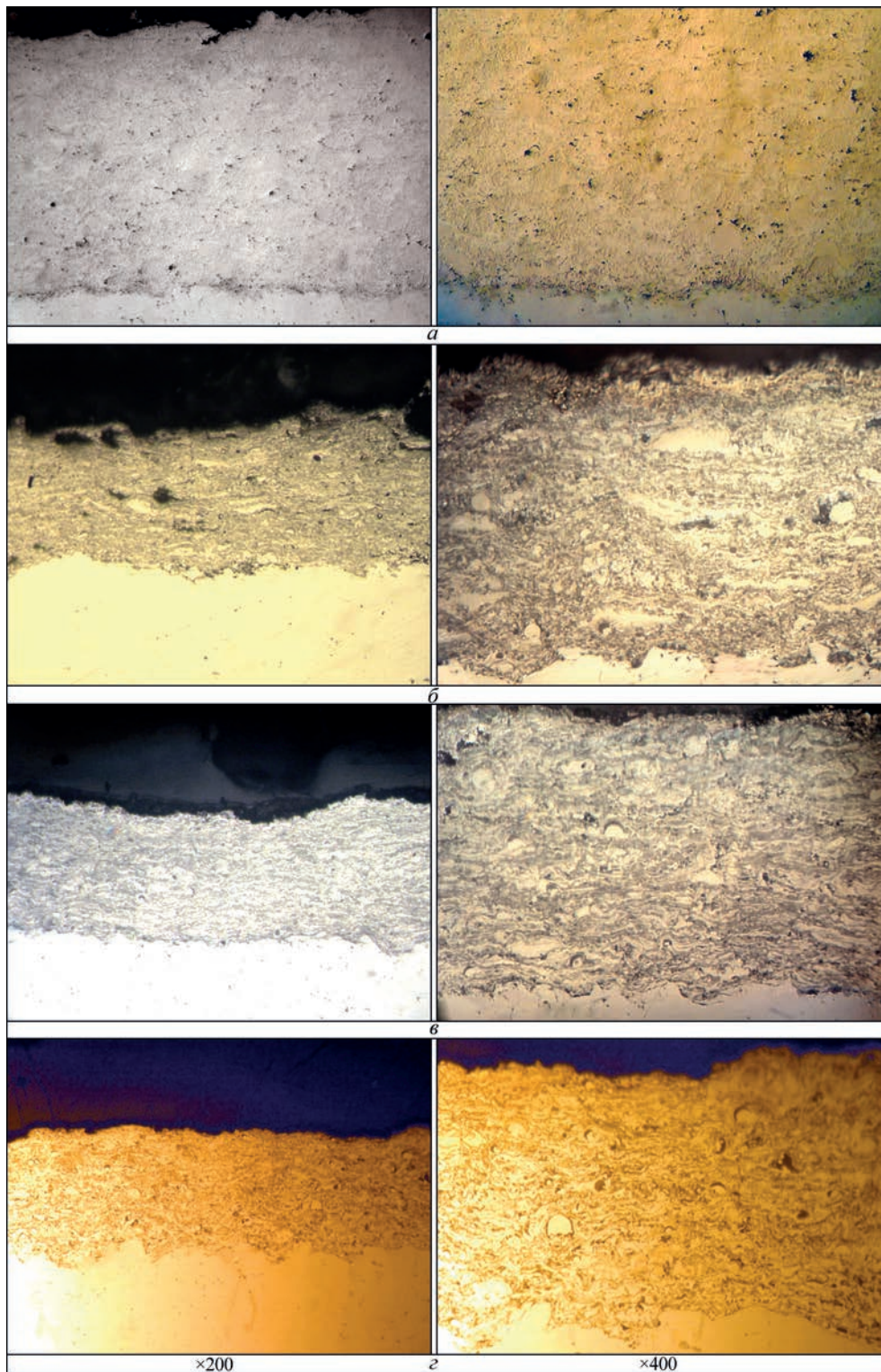


Рис. 1. Мікроструктура детонаційних покриттів, отриманих з порошків FeMoNiCrB (а), FeMoNiCrB + ZrB₂ (б), FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C (в), FeMoNiCrB + FeTiO₃ (г)

покриттів знижуються до $2...3 \cdot 10^{-6}$ А/см². Відсутність пасивації покриття в середовищі 3% NaCl може бути обумовлено тим, що цей розчин належить до агресивних середовищ з високим вмістом Cl⁻, в присутності якого відбувається поступове витіснення ним кисню з захисної плівки на поверхню електрода. При цьому анодний процес утворення захисного оксиду сповільнюється анод-

ним процесом утворення легкорозчинного з'єднання металів з Cl⁻ [10].

Дослідження електрохімічної поведінки детонаційних покриттів в 10%-му розчині H₂SO₄ показало, що введення ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ призводить до зміщення потенціалу корозії в більш позитивну сторону від -0,12 до -0,044 В, корозійні процеси протікають з водневою деполя-

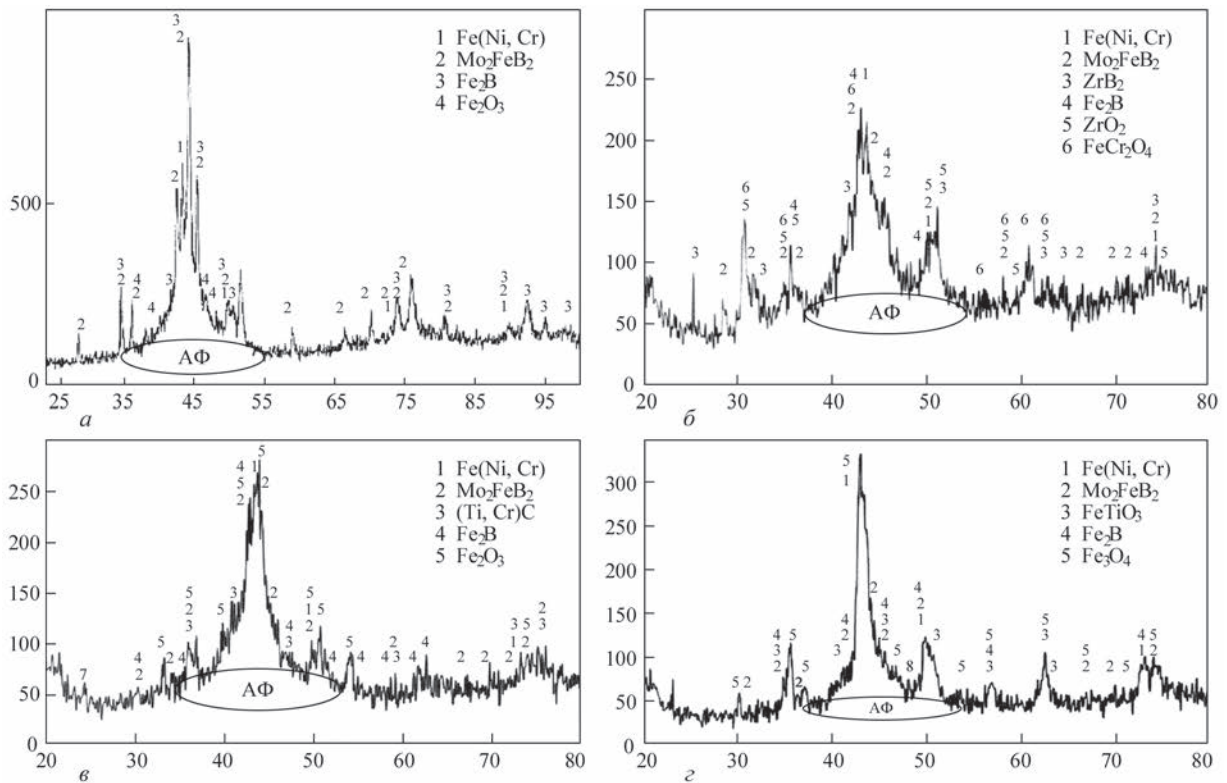


Рис. 2 – Рентгенограми детонаційних покриттів, отриманих з порошків: FeMoNiCrB (а), FeMoNiCrB + ZrB₂ (б) FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C (в), і FeMoNiCrB + FeTiO₃ (г)

ризацією, струми корозії знаходяться в межах $1,6 \dots 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$. Отримані анодні поляризаційні криві вказують на відсутність пасивації покриттів в широкому інтервалі потенціалів. Чисті хром і нікель в сірчаній кислоті добре пасивуються [11, 12], в той час як в покриттях, вихідний порошок яких включає ці метали, вони не переходять у пасивний стан. Це можна пояснити наявністю в структурі шару фаз Mo₂FeB₂, ZrB₂, TiC, які є катодами по відношенню до нікелю і хрому. Вони перешкоджають утворенню суцільних оксидних плівок на поверхні покриттів в розчині сірчаної кисло-

ти, в результаті чого система втрачає здатність до пасивації.

Електрохімічні дослідження детонаційних покриттів у 5%-му розчині NaOH показують, що при введенні добавок ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ відбувається зміщення потенціалу корозії в позитивну сторону від $-0,48$ до $-0,34 \text{ V}$ та зниження струмів корозії з $5 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$.

Аналіз отриманих результатів (табл. 4) свідчить про те, що для всіх досліджених покриттів максимальна швидкість корозії має місце в розчині сірчаної кислоти, мінімальна в 3 % NaCl, тоб-

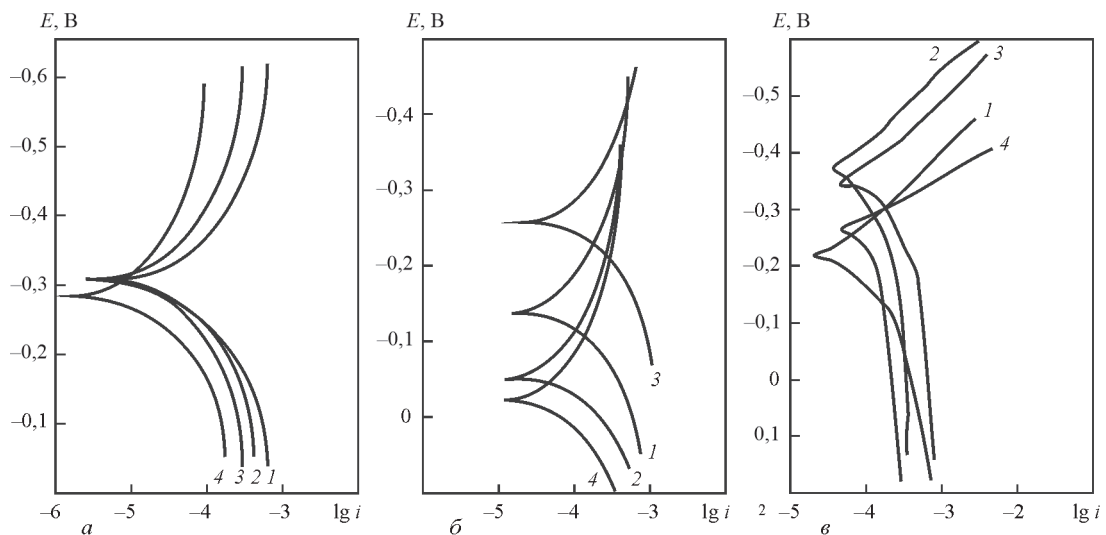


Рис. 3. Поляризаційні криві детонаційних покриттів: а – у 3% NaCl, б – у 10% розчині H₂SO₄, в – у NaOH (1 – FeMoNiCrB, 2 – FeMoNiCrB + ZrB₂, 3 – FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, 4 – FeMoNiCrB + FeTiO₃)

Таблиця 4. Результати електрохімічних випробувань детонаційних покриттів (товщина покриття 500 мкм)

Склад покриття	Електроліт					
	3 % NaCl		5 % NaOH		10 % H ₂ SO ₄	
	E_c , В	i_c , А/см ²	E_c , В	i_c , А/см ²	E_c , В	i_c , А/см ²
FeMoNiCrB	-0,35	$4 \cdot 10^{-6}$	-0,48	$5 \cdot 10^{-6}$	-0,12	$1,9 \cdot 10^{-5}$
FeMoNiCrB + ZrB ₂	-0,31	$2,5 \cdot 10^{-6}$	-0,34	$2 \cdot 10^{-6}$	-0,24	$1,5 \cdot 10^{-5}$
FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C	-0,33	$3 \cdot 10^{-6}$	-0,33	$3 \cdot 10^{-6}$	-0,08	$1,6 \cdot 10^{-5}$
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	-0,28	$3 \cdot 10^{-6}$	-0,44	$3 \cdot 10^{-6}$	-0,04	$1,8 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 5. Показники корозійної стійкості детонаційного КП на основі FeMoNiCrB

Склад покриття	Показник швидкості корозії		Термін служби, рік	Бал корозійної стійкості	Група корозійної стійкості
	K_b , г/м ² год	K_p , мм/рік			
3 % NaCl					
FeMoNiCrB	0,042	0,047	10,6	4	Стійкі
FeMoNiCrBi+ZrB ₂	0,026	0,029	17,2	4	->-
FeMoNiCrBi+(Ti,Cr)C	0,031	0,035	14,3	4	->-
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	0,031	0,035	14,3	4	->-
5 % NaOH					
FeMoNiCrB	0,047	0,052	9,6	4	Стійкі
FeMoNiCrBi+ZrB ₂	0,033	0,038	13,1	4	->-
FeMoNiCrBi+(Ti,Cr)C	0,038	0,04	12,5	4	->-
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	0,04	0,043	11,1	4	->-
10 % H ₂ SO ₄					
FeMoNiCrB	0,2	0,22	2,3	6	Зниженої стійкості
FeMoNiCrBi+ZrB ₂	0,156	0,174	2,8	6	->-
FeMoNiCrBi+(Ti,Cr)C	0,166	0,186	2,5	6	->-
FeMoNiCrB + FeTiO ₃	0,182	0,21	2,4	6	->-

то швидкість корозії корелює з величиною рН розчину і зменшується в області від слабокислих до нейтральних і лужних розчинів. Тому швидкість корозії в 10%-му розчині H₂SO₄ (рН 1) вище, ніж в нейтральному 3%-му NaCl (рН 8,0) і в лужному розчині 5%-му NaOH (рН 13).

Таким чином, електрохімічні випробування в досліджуваних розчинах показали, що в детонаційних покриттях з КП FeMoNiCrB + (ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃) струм корозії зменшується від $2 \cdot 10^{-6}$ в 3 % NaCl та 5 % NaOH до $1,5 \cdot 10^{-5}$ А/см² в 10 % H₂SO₄. Введення ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃ в усі покриття призводить до зниження величини струму корозії в 1,5...3,0 рази в порівнянні з матеріа-

лом основи FeMoNiCrB в залежності від роду добавки в напрямку FeTiO₃ → (Ti,Cr)C → ZrB₂.

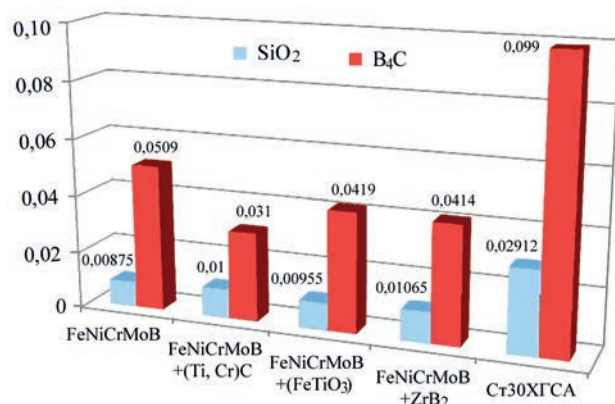
На підставі отриманих експериментальних даних була проведена порівняльна оцінка довговічності досліджених покриттів однакової товщини в розглянутих корозійних середовищах. Результати розрахунку прогнозованого терміну служби досліджених покриттів при товщині 500 мкм наведені в табл. 5.

Результати випробувань зносостійкості детонаційних покриттів представлені в табл. 6 і на рис. 4.

При використанні абразиву SiO₂ найвища зносостійкість спостерігається у покриттів, отриманих з порошку FeMoNiCrB, а в разі абразиву В₄С найбільш зносостійким з розроблених композиційних покриттів є покриття, отримане з композиційного порошку FeMoNiCrB + 30 об. % (Ti,Cr)C. Це корелює з середньою мікротвердістю покриттів (див. табл. 3), яка у випадку КП FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C становить 4450 МПа проти ~ 3800 МПа в КП FeMoNiCrB + FeTiO₃ і КП FeMoNiCrB + ZrB₂.

Висновки

1. Покриття, нанесені детонаційним напленням з композиційних порошоків (КП) FeMoNiCrB – ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃, і порошку FeMoNiCrB, мають щільну ламелярну багатофазну структуру. Мікротвердість FeMoNiCrB-покриття становить 4855 ± 1023 МПа, компози-

Рис. 4. Результати випробувань покриттів на зношення при терті об абразиви SiO₂ та В₄С, г/см

Таблиця 6. Результати випробувань детонаційних покриттів на основі FeMoNiCrB на абразивну зносостійкість при терті об нежорстко закріпленій абразив

Склад покриття	Абразив SiO ₂		Абразив В ₄ С	
	Приведений знос, г/км	Відносна зносостійкість	Приведений знос, г/км	Відносна зносостійкість
FeMoNiCrB	0,00875±0,00075	3,3	0,0509±0,002	1,9
FeMoNiCrB +ZrB ₂	0,01065±0,00015	2,6	0,0419±0,0003	2,3
FeMoNiCrB +(Ti,Cr)C	0,01±0	2,7	0,031±0,001	3,0
FeMoNiCrB +FeTiO ₃	0,00955±0,00595	2,9	0,0414±0,0003	2,3
Сталь 30ХГСА	0,0291±0,00145	-	0,099±0,0002	-

ційних покриттів FeMoNiCrB + (ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO – 3830 ± 570 МПа, 4450 ± 700 МПа і 3750 ± 620 МПа, відповідно.

2. Всі отримані покриття мають аморфно-кристалічну структуру. Склад всіх покриттів включає тверді розчини на основі Fe і (Fe,Ni) та боридні фази Mo₂FeB₂, Fe₂B, оксиди, а також аморфну фазу, вміст якої в процесі напилення в порівнянні з порошком збільшується.

3. Проведені електрохімічні дослідження показали, що корозійна стійкість детонаційних покриттів залежить від рН розчину. У лужних і нейтральних середовищах корозійна стійкість покриттів на порядок вище, ніж в кислому середовищі, що обумовлено наявністю в ній аніонів SO₄⁻². Введення в покриття добавок ZrB₂, (Ti,Cr)C і FeTiO₃ знижує в 2...3 рази швидкість корозії в 3%-му розчині NaCl і 5%-му NaOH і слабо впливає на швидкість корозії в H₂SO₄. Детонаційні покриття, які були досліджені в розчинах 3%-му NaCl і 5%-му NaOH віднесені, відповідно до ГОСТ 308-85 при товщині 500 мкм до стійких зі строком служби 14...17 років і 11...13 років відповідно, а в 10%-му H₂SO₄ – до заниженостійких зі строком служби 2,4...2,8 років.

4. Дослідження зносостійкості детонаційних покриттів FeMoNiCrB і КП FeMoNiCrB в умовах зношування в незакріплених абразивах SiO₂ і В₄С показали, що показники відносної зносостійкості по відношенню до еталону «сталь 30ХГСА» складають 2,6...3,3 в середовищі SiO₂ і 1,9...2,9 – в середовищі В₄С. Найбільш висока зносостійкість 2,7...3,0 досягнута у випадку покриття FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, що має мікротвердість 4450 ± 700 МПа.

Список літератури

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. (1987) *Аморфные металлы*. Москва, Металлургия.
2. Люборский Ф.Е. (1987) *Аморфные металлические сплавы*. Москва, Металлургия.
3. Куницкий Ю.А., Борисов Ю.С., Коржик В.Н. (1989) *Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике*. Киев, Техника.
4. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Бурлаченко та ін. (2021) Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з добавками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів *Автомат. зварювання*, **11**, 44–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.08>

5. ГОСТ Р 9.905-2007 (2007) *Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования*. Москва, Изд-во стандартов.
6. Жук Н.П. (2006) *Курс теории коррозии и защиты металлов*. Москва, ООО ТИД «Альянс».
7. Семенова И. В., Флорионович Г.М., Хорошилов А. В. (2002) *Коррозия и защита от коррозии*. Москва, ФИЗМАТЛИТ.
8. ГОСТ 23.208-79 (1981) *Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы*. Москва, Изд-во стандартов.
9. Григоренко Г.М., Борисова А.Л., Адеева А.И., Сладкова В.Н. (1995) Применение метода количественного рентгеноструктурного анализа при исследовании фазового состава газотермических покрытий. *Проблемы СЭМ*, **2**, 63–71.
10. ГОСТ 9.909-86. (1999) *Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические*. Москва, Изд-во стандартов.
11. Герц И. (1979) Пассивирование деформированного никеля в серной кислоте. *Защита металлов*, **15**, **1**, 29–33.
12. Тульский Г.Г. Артеменко В.М., Дерібо С.Г. (2019) *Теоретична електрохімія*. Харків, Харків. політехн. ін-т.

References

1. Suzuki, K., Fujimori, H., Hashimoto, K. (1987) *Amorphous metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Lyuborskij, F.E. (1987) *Amorphous metal alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Kunitskij, Yu.A., Borisov, Yu.S., Korzhik, V.N. (1989) *Noncrystalline metal materials and coatings in engineering*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
4. Borisov, Yu.S., Borisova, 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**, 44-53. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2021.11.07>
5. GOST R 9.905-2007 (2007) *Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion test methods. General requirements*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].
6. Zhuk, N.P. (2006) *Lectures on theory of corrosion and metal protection*. Moscow, Alyans.
7. Semenova, I.V., Florionovich, G.M., Khoroshilov, A.V. (2002) *Corrosion and protection from corrosion*. Moscow, Fizmatlit [in Russian].
8. GOST 23.208-79 (1981) *Ensuring of wear resistance of products. Wear resistance testing of materials by friction against loosely fixed abrasive particles*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].
9. Grigorenko, G.M., Borisova, A.L., Adeeva, A.I., Sladkova, V.N. (1995) Application of method of quantitative X-ray structure analysis at investigation of phase composition of thermal coatings. *Problemy Spets. Elektromatellurgii*, **2**, 63–71 [in Russian].
10. GOST 9.909-86 (1999): *Metals, alloys, metal and nonmetal inorganic coatings*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].
11. Gerts, I. (1979) Passivation of wrought nickel in sulfuric acid. *Zashchita Metallov*, **15**(1), 29–33 [in Russian].
12. Tul'skiy, G.G., Artemenko, V.M., Deribo, S.G. (2019) *Theoretical electrochemistry*. Kharkiv, KhPI [in Ukrainian].

PRODUCING AND PROPERTIES OF DETONATION COATINGS BASED ON FeMoNiCrB AMORPHIZING ALLOY WITH ADDITION OF STRENGTHENING PHASES

Yu.S. Borisov, A.L. Borisova, T.V. Tsimbalista, A.I. Kildiy, K.V. Yantsevich, Z.G. Ipatova

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The structure and properties of amorphizing composite detonation coatings based on FeMoNiCrB alloy were studied. FeMoNiCrB + ZrB₂, FeMoNiCrB + (Ti,Cr)C, FeMoNiCrB + FeTiO₃ composite powders were used for coatings deposition, which were produced from a mixture of the composition powders by mechanical alloying. It is found that as a result of detonation spraying of all the powder compositions, the formed coatings have dense, lamellar multiphase structure. The coating composition includes Fe(Ni,Cr) solid solutions, Mo₃FeB₂ and Fe₂B borides, dispersed inclusions of alloying additives (ZrB₂, (Ti,Cr)C, FeTiO₃) and oxides (ZrO₂ and FeCr₂O₄ or Fe₂O₃, or Fe₃O₄), as well as an amorphous phase, the amount of which in the coating structure has increased, as a result of the detonation spraying process. The values of microhardness, corrosion resistance, fatigue life and wear resistance of the composite detonation coatings are given. 12 Ref., 6 Tabl., 4 Fig.

Keywords: detonation spraying, composite powders, amorphizing iron alloy, zirconium boride, titanium-chromium carbide, iron titanate, coating, corrosion resistance, wear resistance

Надійшла до редакції 12.10.2021



Düsseldorf, Germany

join the best: 09 - 13 May 2022

ПЕРЕПОЧНІТЬ СВІЙ БІЗНЕС

Підготовка до Wire and Tube 2022 йде повним ходом. 9 травня 2022 року Wire and Tube відкриє свої двері в Дюссельдорфі. Ці провідні світові торгові ярмарки є родзинкою для індустрії обробки дроту, кабелю і труб: платформа для прогресу, стартова площадка для бізнесу. Кожен, хто приймає рішення або експерт, має бути на найважливішому світовому шоу для цих галузей. Які останні розробки в техніці, технології, продуктах і процесах? Тут можуть зустрітися лідери світового ринку та початківці. Якими є поточні реакції в області цифровізації та розумного виробництва, від штучного інтелекту до робототехніки? Виставки дадуть відповіді на ці та багато інших запитань, які виникають на практиці.

XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»

Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmw>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей

до 19.08.2022 р.

Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі

до 05.09.2022 р.

Оплата реєстраційного внеску

до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2022>