

ДЕТОНАЦІЙНЕ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ, ЩО МІСТЯТЬ МАХ-ФАЗУ Cr_2AlC

Н.В. Вігілянська¹, С. Senderowski², Т.В. Цимбаліста¹, К.В. Янцевич¹, А.І. Кільдій¹, О.Й. Гудименко³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pewinataliya@gmail.com

²Warsaw university of technology. Pl. Politechniki 1, 00-661, Warsaw, Poland

³Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. 02000, м. Київ, пр. Науки, 45.

E-mail: gudymen@ukr.net

У роботі досліджено процес формування покриттів, що містять МАХ-фазу Cr_2AlC , в умовах детонаційного напилення з використанням порошків, отриманих методом механохімічного синтезу. В якості вихідних компонентів застосовано порошкові суміші систем $Cr-Al-C$ та Cr_3C_2-Al . Встановлено, що в системі $Cr-Al-C$ внаслідок механохімічного синтезу протягом 1,5...5 год нові фази не утворюються, натомість синтез МАХ-фази Cr_2AlC відбувається в процесі детонаційного напилення МХС-порошку даної суміші. У системі Cr_3C_2-Al спостерігається формування МАХ-фази Cr_2AlC вже на етапі обробки після 1,5 год. За рахунок протікання реакції взаємодії компонентів у процесі детонаційного напилення вміст МАХ-фази збільшується в покритті відносно МХС-порошку. У складі обох типів покриттів наявні фази карбідів хрому та оксидних складових хрому та алюмінію. Одержані покриття характеризуються високою мікротвердістю (близько 5000 МПа), щільною ламелярною структурою та мають корозійну тривкість у середовищі 3%-го розчину NaCl. Бібліогр. 18, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: МАХ-фаза, детонаційне напилення, покриття, мікроструктура, корозійна тривкість

Вступ. В останні роки матеріали на основі МАХ-фаз викликають підвищену зацікавленість для використання в промисловості у зв'язку з унікальними поєднаннями в них властивостей як металу, так і кераміки, яким вони завдячують своїй типовій наноламінатній структурі [1, 2]. Серед відомих на сьогодні МАХ-фаз фаза Cr_2AlC викликає значну цікавість завдяки комплексу фізико-хімічних властивостей, а саме: низькій густині, відмінним механічним властивостям, високій жорсткості, легкості обробки, стійкості до пошкоджень, корозійній тривкості в багатьох розчинах солей та кислот, електричним і теплопровідним властивостям [3–6]. Серед методів одержання МАХ-фази Cr_2AlC найбільшого поширення знаходять методи спікання, у тому числі іскрового плазмового спікання, гарячого пресування, методи самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС) та механохімічного синтезу [7–11]. В якості вихідних компонентів використовують порошки як простих елементів, так і сполук карбідів, оксидів та інтерметалідів у різному співвідношенні. Одержані матеріали мають високу міцність, жаростійкість і корозійну тривкість.

Іншим методом використання матеріалів на основі МАХ-фаз є нанесення їх на поверхні деталей у вигляді покриттів. Більшість наявних досліджень присвячено формуванню покриттів на

основі МАХ-фази Cr_2AlC у вигляді тонких плівок, які одержують методом магнетронного нанесення шляхом розпилення мішеней окремих елементів або сегментованих складених мішеней [12, 13]. Не дивлячись на високу чистоту та щільність магнетронних покриттів, вони не можуть використовуватись в екстремальних умовах при високих навантаженнях у зв'язку з невеликою товщиною, яка складає кілька мікрон.

Для одержання покриттів на основі МАХ-фаз завтовшки в кілька сотен мікрметрів використовують методи газотермічного напилення, такі як плазмово-дугове, високошвидкісне газополум'яне та холодне газодинамічне напилення [14]. В якості сировини для напилення використовують порошки з синтезованою МАХ-фазою Cr_2AlC , які одержують методом спікання [15], і порошки механічних сумішей вихідних компонентів, таких як $Cr + Al +$ графіт [16], $Cr_3C_2 + Al + Cr$ [17]. При використанні для напилення порошків, що містять МАХ-фазу, внаслідок окислення частинок порошку та протікання реакцій розкладання, що пов'язано з неконгруентним плавленням МАХ-фаз, вміст МАХ-фази Cr_2AlC у покриттях суттєво знижується відносно вихідного порошку, що є однією з основних проблем при напиленні такого типу покриттів. У випадку напилення порошків механічних сумішей синтез МАХ-фази відбувається в про-

Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>,

Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>,

© Гудименко О.Й. – <https://orcid.org/0000-0002-5866-8084>

Н.В. Вігілянська, С. Senderowski, Т.В. Цимбаліста, К.В. Янцевич, А.І. Кільдій, О.Й. Гудименко, 2025

цесі напilenня та формування шару покриття при взаємодії вихідних компонентів. Додатково підвищити вміст МАХ-фази в таких покриттях вдається проведенням наступної термообробки [16].

Метою даної роботи є дослідження формування покриттів, що містять МАХ-фазу Cr_2AlC , в умовах детонаційного методу напilenня з використанням порошків, отриманих методом механохімічного синтезу.

Матеріали та методики досліджень. В якості матеріалів для напilenня покриттів детонаційним методом використовували порошки, одержані методом механохімічного синтезу (МХС) порошкових сумішей складів $73Cr-19Al-8C$ та $91Cr_3C_2 + 9Al$ (мас. %). Характеристику вихідних порошків, які було використано для виготовлення механічних сумішей для проведення процесу МХС, наведено в табл. 1.

Співвідношення компонентів порошкової суміші $Cr-Al-C$ було розраховано на одержання МАХ-фази Cr_2AlC згідно з реакцією $2Cr + Al + C = Cr_2AlC$; компонентів суміші Cr_3C_2-Al – на основі термодинамічної оцінки ймовірності протікання реакцій у системі з утворенням МАХ-фази Cr_2AlC та попередньо проведених досліджень формування МАХ-фази Cr_2AlC в умовах плазово-дугового напilenня порошків системи Cr_3C_2-Al [18].

Процес МХС порошкових сумішей проводили у високоенергетичному планетарному млині «Активатор 2SL» при швидкості обертання барабанів 1000/1500 об/хв, час обробки становив 1,5 і 5 год.

Для напilenня покриттів використовували установку детонаційного напilenня «Перун-С». В якості детонаційної суміші використовували суміш кисню з пропан-бутаном з додаванням повітря, витрата та співвідношення кисню до пропан-бутану – 3:1, кількість порошку за постріл ≈ 100 мг, кількість пострілів 100. Частота проходження циклів 6,6 s^{-1} . Технологічні параметри детонаційного напilenня, такі як: витрата пального газу пропан-бутану ($Q_{C_3H_8}$), витрата кисню (Q_{O_2}), витрата газу-розріджувача (повітря) ($Q_{пов}$), витрата транспортуючого газу (повітря) ($Q_{тр}$) та дистанція напilenня (L), наведено в табл. 2. Техно-

Таблиця 1. Характеристика вихідних порошків механічних сумішей

Порошок	Марка	Розмір частинок, мкм	Вміст домішок, мас. %
Cr	ПХ1М	<20	0,009 N; 0,07 C; 0,20 Fe; 0,10 Ni; 0,10 Si; 0,10 Ca; 0,30 O; P і 0,032 O
Al	ПА-4	40...50	<0,4 Si, <0,35 Fe, <0,02 Cu
Графіт	ГЛ-1	<40	Зольність <13 %
Cr_3C_2	ПКХ-1С	<40	–

Таблиця 2. Технологічні параметри детонаційного напilenня покриттів, що містять МАХ-фазу Cr_2AlC

Витрати газів, $m^3/год$				L , мм
$Q_{C_3H_8}$	Q_{O_2}	$Q_{пов}$	$Q_{тр}$	
0,5	1,55	0,4	0,5	110

логічні параметри детонаційного напilenня були обрані з розрахунку отримання товщини покриття 4...6 мкм за 1 цикл та мінімізації окислення порошкового матеріалу в процесі напilenня.

Для дослідження мікроструктури частинок МХС-порошків і напilenних покриттів використовували оптичний мікроскоп Neophot-32 з пристроєм для цифрового фотографування. Дослідження фазового складу частинок порошку та покриттів проводили за допомогою дифрактометра PANalytical X'Pert PRO з використанням $CuK\alpha$ -випромінювання ($\lambda = 0,15406$ нм). Напруга на аноді трубки становила 45 кВ, струм – 40 мА. Дифрактограми знімали з кроком $0,025^\circ$ при часі накопичення в точці 1 с. Обробку даних дифрактометричних вимірювань здійснювали за допомогою програми High Score Plus. Мікротвердість покриттів HV вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 50 г.

Дослідження корозійної тривкості покриттів проводили потенціостатичним методом. Покриття завтовшки 500 мкм наносили на зразки зі сталі Ст3 розміром $50 \times 50 \times 3$ мм. Електрохімічні дослідження здійснювали на потенціостаті П-5827М зі швидкістю розгортання 2 мВ/с за температури 18...20 $^\circ C$. В якості робочих електродів використовували досліджувані зразки, в якості електрода порівняння – хлорсрібний електрод ($Ag/AgCl$), допоміжним електродом слугувала платина. Дослідження проводили в 3%-му розчині NaCl. Струм та потенціал корозії знаходили графічним методом із поляризаційних кривих.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз мікроструктури порошків систем $Cr-Al-C$ та Cr_3C_2-Al (рис. 1) свідчить про формування в процесі МХС внаслідок процесів подрібнення та «холодного зварювання», що повторюються, частинок конгломератного типу неправильної форми як після 1,5 год, так і після 5 год обробки. Розмір порошків продуктів МХС після 1,5 год обробки складає $d_{10} = 9$ мкм, $d_{50} = 21$ мкм, $d_{90} = 43$ мкм для системи $Cr-Al-C$ та $d_{10} = 8$ мкм, $d_{50} = 17$ мкм, $d_{90} = 45$ мкм для системи Cr_3C_2-Al . При збільшенні часу обробки до 5 год розмір продуктів МХС суттєво не змінюється і складає $d_{10} = 10$ мкм, $d_{50} = 21$ мкм, $d_{90} = 41$ мкм для системи $Cr-Al-C$ та $d_{10} = 8$ мкм, $d_{50} = 16$ мкм, $d_{90} = 40$ мкм для системи Cr_3C_2-Al .

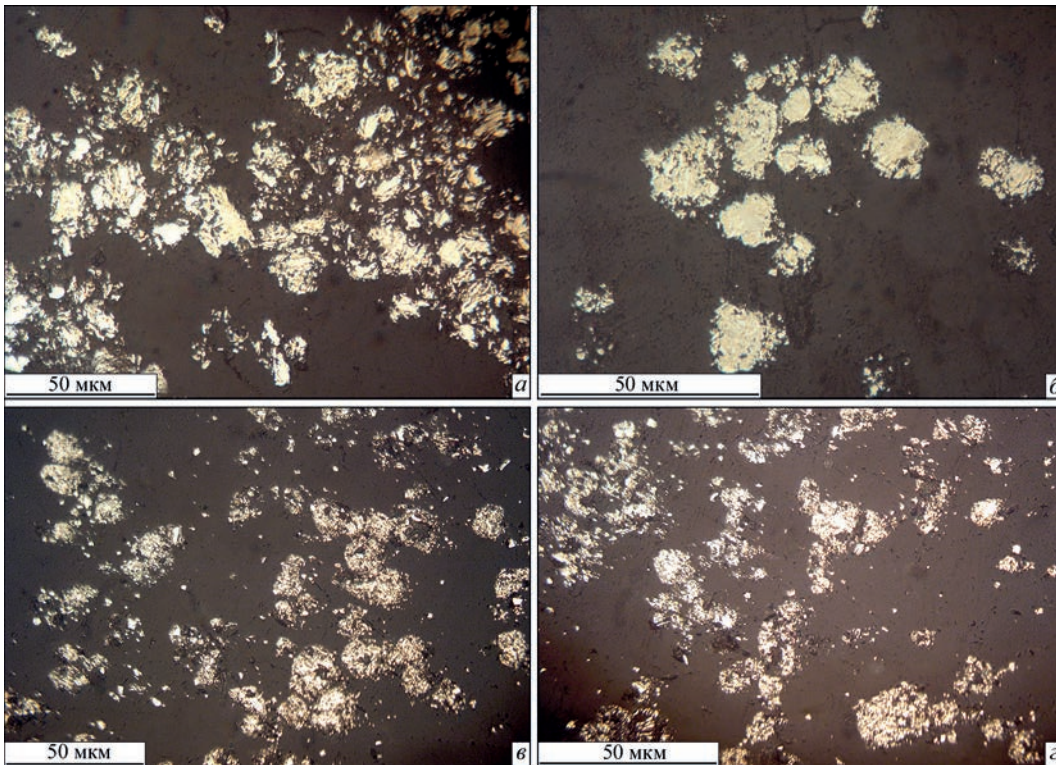


Рис. 1. Мікроструктура порошків систем Cr–Al–C (а, б) та Cr₃C₂–Al (в, з), одержаних методом МХС протягом 1,5 (а, в) та 5 (б, з) год

Методом рентгеноструктурного фазового аналізу (РСФА) встановлено, що в процесі МХС протягом 1,5 та 5 год порошку системи Cr–Al–C синтезу нових фаз не відбувається і на рентгенограмах отриманих порошків наявні лише піки фази хрому та алюмінію (рис. 2, а, б). Фази графіту на рентгенограмах не виявлено, що може бути результатом його переходу до аморфного стану або подрібнення у млині в процесі обробки до

нанорозміру. Зі збільшенням часу обробки до 5 год спостерігається деяке зміщення в бік нижчих кутів ліній хрому, що може свідчити про розчинення алюмінію в хромі з утворенням твердого розчину.

У випадку порошку системи Cr₃C₂–Al в процесі МХС як при 1,5, так і при 5 год обробки відбувається взаємодія вихідних компонентів суміші карбідів хрому та алюмінію з утворенням в кінцевому

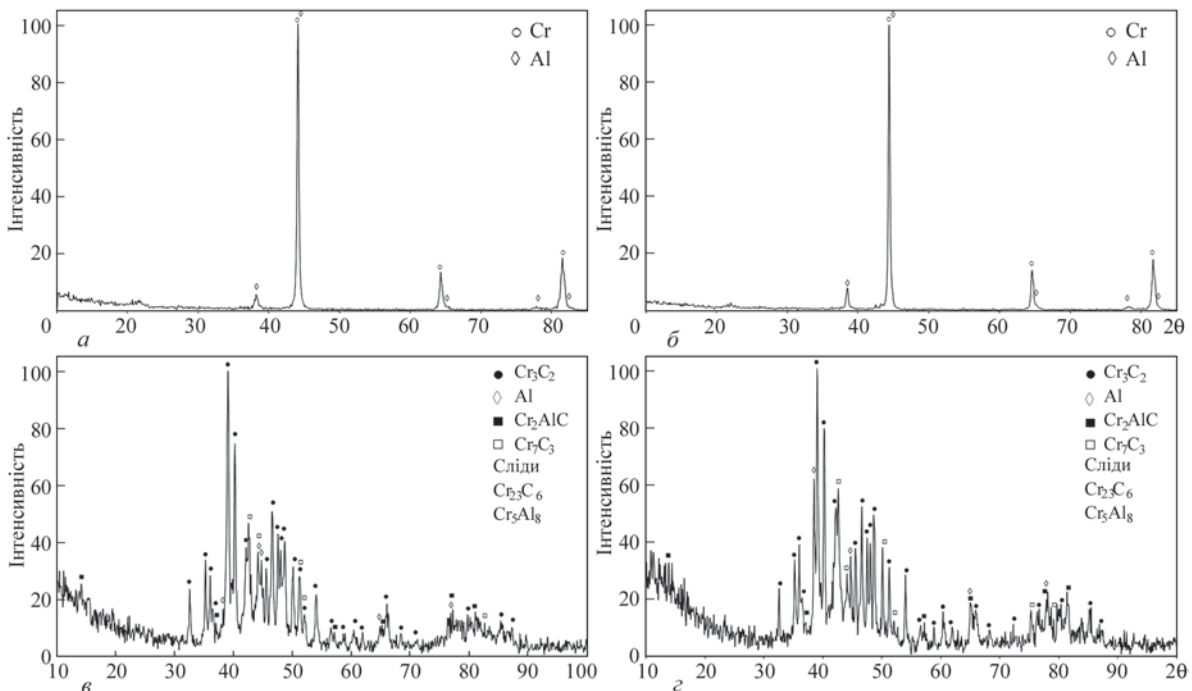


Рис. 2. Рентгенограми порошків систем Cr–Al–C (а, б) та Cr₃C₂–Al (в, з), одержаних методом МХС протягом 1,5 (а, в) та 5 (б, з) год

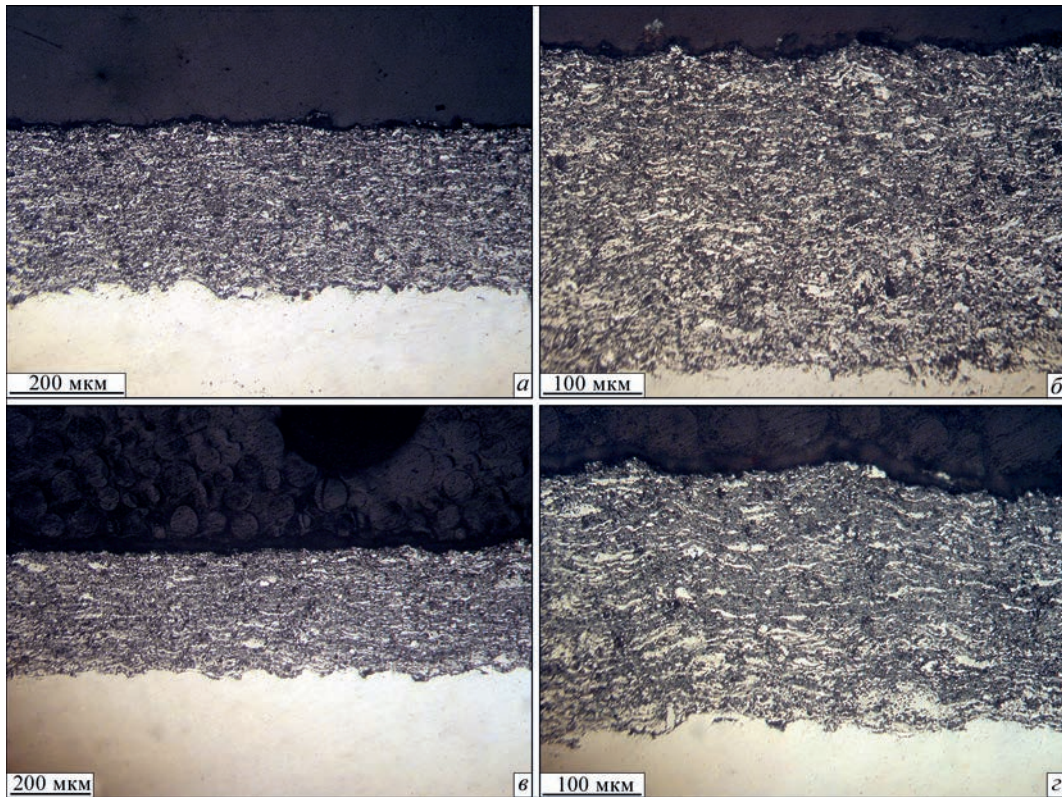


Рис. 3. Мікроструктура детонаційних покриттів з МХС-порошків: а, б – Cr–Al–C; в, г – Cr₃C₂–Al

продукті МАХ-фази Cr₂AlC та незначної кількості інтерметалідної сполуки Cr₅Al₈ (рис. 2, в, г). Крім того, у порошках наявні фази вихідних компонентів Cr₃C₂ та Al, а також карбідів Cr₇C₃ та Cr₂₃C₆.

Оскільки фазовий склад одержаних МХС-порошків суттєво не відрізняється при обробці протягом 1,5 та 5 год, в подальшому для досліджень формування покриттів в умовах детонаційного наплення використовували МХС-порошки складів систем Cr–Al–C та Cr₃C₂–Al, одержані протягом 1,5 год обробки.

У результаті детонаційного наплення одержаних МХС-порошків формуються щільні покриття з тонколамелярною структурою, яка складається зі світлих та темно-сірих оксидних ламелей, що чергуються (рис. 3). Кількість оксидної складової у покритті Cr–Al–C складає ≈35 %, пористість ≈7 %; у покритті Cr₃C₂–Al – ≈30 % та ≈4 % відповідно.

Мікротвердість покриттів Cr–Al–C та Cr₃C₂–Al складає 4910 ± 1150 та 5030 ± 1015 МПа відповідно. Наявність великого розкиду значень мікротвердості в діапазоні 3000...10000 МПа пов'язана з присутністю різномірних фаз у покритті.

Основними фазами в напилених покриттях систем Cr–Al–C та Cr₃C₂–Al є фази карбідів хрому в кількісному співвідношенні згідно з інтенсивністю піків: Cr₇C₃ > Cr₃C₂ > Cr₂₃C₆ (рис. 4). У випадку наплення покриття системи Cr–Al–C поява карбідів хрому обумовлена протіканням взаємодії вихідних компонентів порошку хрому та графіту в процесі наплення. У випадку наплення покриття системи Cr₃C₂–Al поява значної кількості карбиду Cr₇C₃ пояснюється частковою трансформацією карбиду Cr₃C₂ у процесі наплення під дією температури та при взаємодії частинок порошку з киснем навколишнього середовища. У покриттях наявна

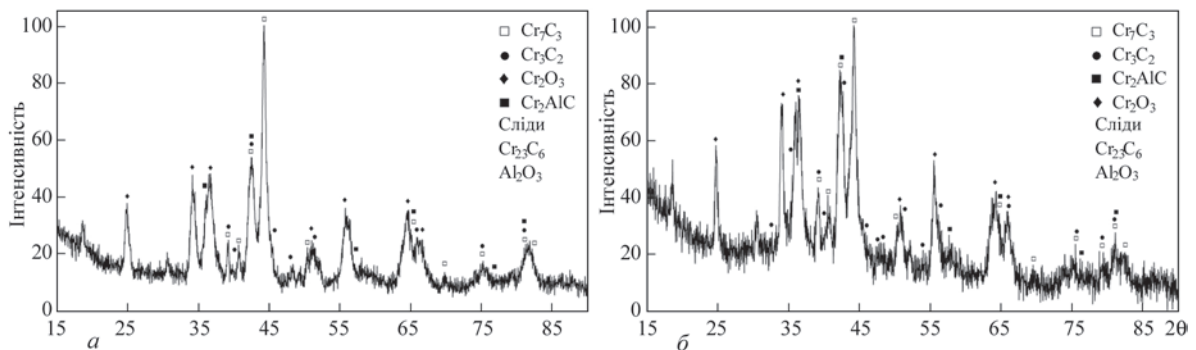


Рис. 4. Рентгенограми детонаційних покриттів систем Cr–Al–C (а) та Cr₃C₂–Al (б)

значна кількість оксиду хрому Cr_2O_3 та незначна кількість оксиду алюмінію Al_2O_3 модифікації корунд. На відміну від МХС-порошків у покриттях відсутня фаза чистого алюмінію, що свідчить про його повну взаємодію в процесі напилення з компонентами порошоків Cr, C, Cr_3C_2 та киснем навколишнього середовища. У покриттях обох типів наявна МАХ-фаза Cr_2AlC , причому інтенсивність піків МАХ-фази в покритті Cr_3C_2-Al є значно вищою, що може свідчити про більшу кількість в ній МАХ-фази. Також зазначається збільшення інтенсивності піків, що відповідають МАХ-фазі, на рентгенограмі покриття системи Cr_3C_2-Al відносно піків на рентгенограмі МХС-порошку, що свідчить про протікання процесу взаємодії компонентів порошку в процесі детонаційного напилення та формування шару покриття з утворенням МАХ-фази.

Дослідження кінетики електродних потенціалів детонаційних покриттів систем Cr-Al-C та

Cr_3C_2-Al дозволили встановити, що значення електродного потенціалу зразків стабілізується через 25...30 хв. Стаціонарні потенціали $E_{ст}$ складають -0,4 та -0,44 В відповідно. Характерні поляризаційні криві покриттів наведено на рис. 5; електрохімічні характеристики покриттів – у табл. 3. Для порівняння в табл. 3 наведені також характеристики Ст3 та нержавких сталей 40Х13 і 12Х18Н10Т.

Аналіз поляризаційних кривих показав, що хід катодних та анодних поляризаційних кривих для детонаційних покриттів обох складів майже не відрізняється. Струм корозії для покриття системи Cr_3C_2-Al є в 1,25 рази нижчим, ніж покриття системи Cr-Al-C, що свідчить про його вищу корозійну тривкість. Це пов'язано, вочевидь, з більшим вмістом МАХ-фази в покритті Cr_3C_2-Al та дещо нижчою пористістю даного покриття. Після проведення електрохімічних досліджень фазовий склад напилених покриттів суттєво не змінюється (рис. 6), тобто корозійних процесів на поверхні зразків з покриттями не відбувається. Розроблені покриття обох складів за своїми показниками корозійної тривкості не поступаються нержавким сталям і на порядок перевершують вуглецеву сталь.

Висновки

Проведені дослідження продуктів механохімічного синтезу порошкових сумішей складів Cr-Al-C та Cr_3C_2-Al показали формування після 1,5...5 год обробки частинок конгломератного типу розміром в межах $d_{10} = 8...10$, $d_{50} = 16...21$, $d_{90} = 40...45$ мкм. У системі Cr_3C_2-Al фіксується формування МАХ-фази Cr_2AlC вже через 1,5 год обробки; у випадку системи Cr-Al-C у процесі МХС взаємодії компонентів з утворенням нових фаз не відбувається.

У результаті детонаційного напилення одержаних МХС-порошків формуються щільні покриття з тонколамелярною структурою. У покриттях фіксується наявність МАХ-фази Cr_2AlC , а також карбідів хрому та оксидних фаз Cr_2O_3 і Al_2O_3 . Вміст МАХ-фази є вищим у покриттях, сформо-

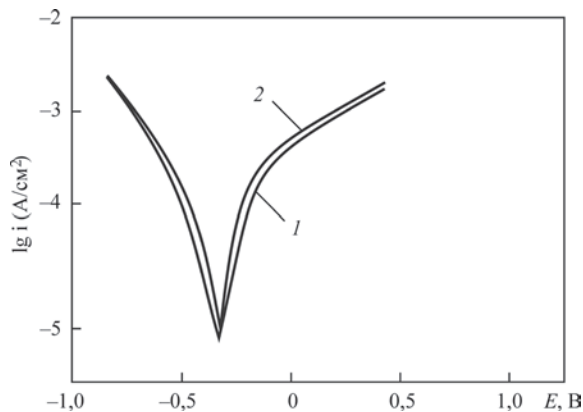


Рис. 5. Поляризаційні криві детонаційних покриттів у 3%-му розчині NaCl: 1 – Cr-Al-C, 2 – Cr_3C_2-Al

Таблиця 3. Електрохімічні характеристики детонаційних покриттів Cr-Al-C та Cr_3C_2-Al у 3%-му розчині NaCl

Матеріал	$E_{ст}$, В	E_c , В	i_c , A/cm ²
ДН-покриття Cr-Al-C	-0,40	-0,36	$2,0 \cdot 10^{-6}$
ДН-покриття Cr_3C_2-Al	-0,44	-0,38	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Ст 3	-0,54	-0,52	$2,4 \cdot 10^{-5}$
40Х13	-0,28	-0,26	$2,0 \cdot 10^{-6}$
12Х18Н10Т	-0,16	-0,18	$1,6 \cdot 10^{-6}$

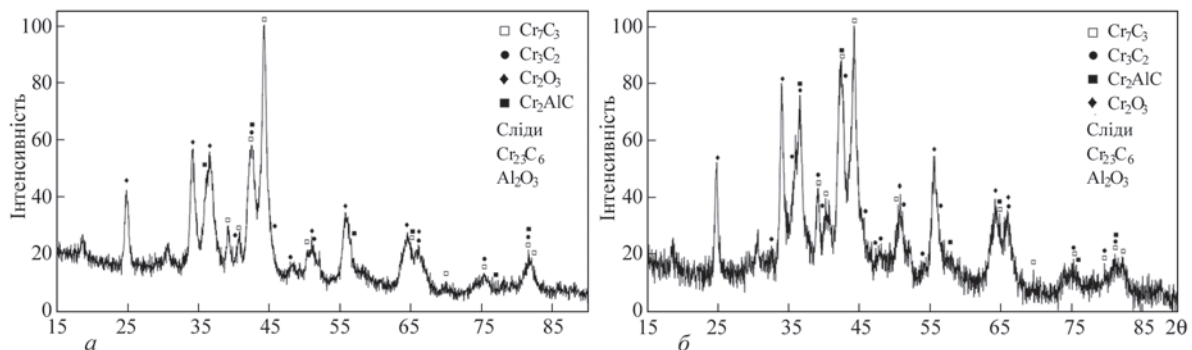


Рис. 6. Рентгенограми детонаційних покриттів систем Cr-Al-C (а) та Cr_3C_2-Al (б) після електрохімічних досліджень в 3%-му розчині NaCl

ваних з порошків системи $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Al}$; встановлено збільшення вмісту МАХ-фази в покритті відносно МХС-порошку за рахунок протікання реакції взаємодії між вихідними компонентами в процесі напilenня.

За результатами потенціостатичних досліджень у 3%-му розчині NaCl встановлено, що покриття на основі системи $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Al}$ характеризуються нижчим струмом корозії ($1,6 \cdot 10^{-6}$ А/см²) порівняно з Cr-Al-C ($2,0 \cdot 10^{-6}$ А/см²), що підтверджує їх вищу корозійну тривкість за рахунок більшого вмісту МАХ-фази та щільнішої структури. Розроблені покриття обох складів за своїми показниками корозійної тривкості не поступаються нержавким сталям і можуть бути рекомендовані для експлуатації у даному агресивному середовищі.

Список літератури/References

- Gonzalez-Julian, J. (2020) Processing of MAX phases: from synthesis to applications. *J. of the American Ceramic Society*, 104(2), 659–690. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.17544>
- Sun, Z.M. (2011) Progress in research and development on MAX phases: a family of layered ternary compounds. *International Materials Reviews*, 56(3), 143–166. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743280410y.0000000001>
- Tian, W., Wang, P., Zhang, G. et al. (2007) Mechanical properties of Cr_2AlC ceramics. *J. of the American Ceramic Society*, 90(5), 1663–1666. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01634.x>
- Tian, W., Wang, P., Zhang, G. et al. (2006) Synthesis and thermal and electrical properties of bulk Cr_2AlC . *Scripta Materialia*, 54(5), 841–846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.11.009>
- Majed, R.A., Hasan, A.M., Faleh, R.F. (2015) Corrosion behavior of V_2AlC and Cr_2AlC materials in acidic media. *Engineering and Technology J.*, 33(4), 845–854. DOI: <https://doi.org/10.30684/etj.33.4A.8>
- Azina, C., Badie, S., Litnovsky, A. et al. (2023) Optical properties and corrosion resistance of Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , and Cr_2AlC as candidates for concentrated solar power receivers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 259, 112433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112433>
- Desai, V., Shrivastava, A., Zala, A.B. et al. (2024) Manufacturing of high purity Cr_2AlC MAX phase material and its characterization. *J. of Materi Eng and Perform*, 33, 9841–9849. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09513-4>
- Shamsipoor, A., Farvizi, M., Razavi, M., Keyvani, A. (2019) Influences of processing parameters on the microstructure and wear performance of Cr_2AlC MAX phase prepared by spark plasma sintering method. *J. of Alloys and Compounds*, 815, 152345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152345>
- Xiao, L.-O., Li, S.-B., Song, G., Sloof, W.G. (2011) Synthesis and thermal stability of Cr_2AlC . *J. of the European Ceramic Society*, 31(8), 1497–1502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.01.009>
- Gonzalez-Julian, J., Llorente, J., Bram, M. et al. (2017) Novel Cr_2AlC MAX-phase/ SiC fiber composites: Synthesis, processing and tribological response. *J. of the European Ceramic Society*, 37(2), 467–475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.09.029>
- Yeh, C.L., Kuo, C.W. (2011) Effects of Al and Al_4C_3 contents on combustion synthesis of Cr_2AlC from $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al-Al}_4\text{C}_3$ powder compacts. *J. of Alloys and Compounds*, 509(3), 651–655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.169>
- Field, M.R., Carlsson, P., Eklund, P. et al. (2014) A combinatorial comparison of DC and high power impulse magnetron sputtered Cr_2AlC . *Surface and Coatings Technology*, 259, 746–750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.052>
- Su, R., Zhang, H., Meng, X. et al. (2017) Synthesis of Cr_2AlC thin films by reactive magnetron sputtering. *Fusion Engineering and Design*, 125, 562–566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.129>
- Vihilianska, N.V., Filonenko, D.V., Yushchenko, A.O. et al. (2024) Thermal spraying of coatings, containing Cr_2AlC max-phase (Review). *The Paton Welding J.*, 3, 24–32. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.03.04>
- Go, T., Sohn, Y.J., Mauer, G. et al. (2019) Cold spray deposition of Cr_2AlC MAX phase for coatings and bond-coat layers. *J. of the European Ceramic Society*, 39(4), 860–867. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.035>
- Zhang, F., Yan, S., Li, C. et al. (2019) Synthesis and characterization of MAX phase Cr_2AlC based composite coatings by plasma spraying and post annealing. *J. of the European Ceramic Society*, 39(16), 5132–5139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.08.039>
- Zhang, F., Yu, G., Yan, S. et al. (2023) Characterization and reaction mechanism of in-situ micro-laminated Cr_2AlC coatings by plasma spraying $\text{Cr}_2\text{C}_3/\text{Al}$ powder mixtures. *Surface and Coatings Technology*, 456, 129271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129271>
- Viglianska, N., Iantsevitch, C., Tsymbalista, T. et al. (2024) Formation of coatings containing Cr_2AlC MAX phase during plasma spraying of mixture of $\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{Al}$ powders. *Coatings*, 14(12), 1584. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14121584>

DETONATION SPRAYING OF COATINGS CONTAINING THE Cr_2AlC MAX-PHASE

N.V. Vigilianska¹, C. Senderowski², T.V. Tsymbalista¹, K.V. Iantsevitch¹, A.I. Kildiy¹, O.Yo. Gudymenko³

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

E-mail: pewinataliya@gmail.com

²Warsaw university of technology. Pl. Politechniki 1, 00-661, Warsaw, Poland

³V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine. 41 Nauky Ave., 03028, Kyiv, Ukraine.

E-mail: gudymen@ukr.net

The paper investigates the process of forming coatings containing the Cr_2AlC MAX-phase under detonation spraying conditions using powders produced by mechanochemical synthesis. The powder mixtures of the Cr-Al-C and $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Al}$ systems were used as initial components. It has been established that no new phases are formed in the Cr-Al-C system as a result of mechanochemical synthesis within 1.5...5 h, while the synthesis of the Cr_2AlC MAX-phase occurs during the detonation spraying of the MChS-powder of this mixture. In the $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Al}$ system, the formation of the Cr_2AlC MAX-phase is observed already at the processing stage after 1.5 h. Due to the interaction reaction of the components in the process of detonation spraying, the content of the MAX-phase increases in the coating relative to the MChS-powder. Both types of coatings contain phases of chromium carbides and oxide components of chromium and aluminium. The produced coatings are characterised by high microhardness (about 5000 MPa), dense lamellar structure and corrosion resistance in a 3 % NaCl solution. 18 Ref., 3 Tabl., 6. Fig.

Keywords: MAX-phase, detonation spraying, coating, microstructure, corrosion resistance

Отримано 02.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 12.05.2025

Прийнято 19.05.2025