

Секція: ПОКРИТТЯ, НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ

УДК: 621.793

Володимир Гвоздецький¹, д.т.н., ст. досл., Нестор Мозола, аспірант; Назар Остапчук², аспірант; Михайло Студент¹, д.т.н., проф.; Христина Задорожна¹ к.т.н., ст.н.с.; Олександр Гасій², д.т.н., проф.; Іван Гончар² к.т.н., доц., Галина Веселівська, к.т.н., ст. досл.

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Національний лісотехнічний університет України

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ НАДЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НАПИЛЕНИХ НА ПІДКЛАДКИ ІЗ СТАЛІ ТА АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ.

Досліджено структуру надзвуків електродугових покриттів (ЕДП) із порошкових дротів (ПД) системи легування Fe-Cr-Ti-Si-Mn-B-C напилених на підкладки із сталі та алюмінієвого сплаву Д16. За використання надзвуків повітряного струменю ЕДП характеризуються більш дисперсною структурою та меншою кількістю мікротріщин та пор, аніж за використання дозвуків повітряного струменю. Екзотермічні реакції, які відбуваються між компонентами шихти ПД в процесі напилення ЕДП та підвищення кінетичної енергії розплавлених краплин за надзвуків режиму напилення, зумовлюють підвищення їх температури на 300...500 °С, та формування зон сплавлення покриття і алюмінієвої основи. Ключові слова: порошкові дроти, електродугові покриття, структура, екзотермічні реакції

V. Hvozdetzkyi¹, N. Mozola, N. Ostapchuk², M. Student¹, Kh. Zadorozhna¹ O. Hasiy², I. Honchar², H. Veseliv's'ka¹

CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURE OF SUPERSONIC ELECTRIC ARC COATINGS FORMED FROM POWDER WIRES DEPOSITED ONTO STEEL AND ALUMINIUM ALLOY SUBSTRATES.

The structure of supersonic electric arc coatings (EACs) from flux cored wires (CW) of the Fe-Cr-Ti-Si-Mn-B-C alloying system sprayed onto steel and aluminum alloy D16 substrates was investigated. When using a supersonic air jet, EACs are characterized by a more dispersed structure and a smaller number of microcracks and pores than when using a subsonic air jet.

Keywords: cored wires, arc coatings, structure, exothermic reactions.

Електродугові покриття (ЕДП) наносили за допомогою електрометалізатора, оснащеного соплом Лавалю з двома вертикальними каналами. Цей пристрій генерував надзвуків повітряний потік (Мах 2). Під час напилення ЕДП системи легування Fe-Cr-Ti-Si-Mn-B-C компоненти шихти ПД плавилися, утворюючи покриття з гетерогенним хімічним складом. Хром і титан реагували з карбідом бору, утворюючи бориди або карбід (залежно від реакцій, показаних у таблиці 1), які рівномірно розподілялися по всьому об'єму ламелей у вигляді нанометричних включень, надаючи їм високу мікротвердість. Реакції (1, 2, 3) вивільняли значну кількість тепла (табл. 1).

Усі частинки в шихті ПД були оточені тугоплавкою оксидною плівкою. Так $t_{пл}(Cr_2O_3) = 2435^{\circ}C$, $t_{пл}(Al_2O_3) = 2050^{\circ}C$, $t_{пл}(SiO_2) = 1700^{\circ}C$, $t_{пл}(Fe_2O_3) = 1566^{\circ}C$, $t_{пл}(Fe_3O_4) = 1538^{\circ}C$, $t_{пл}(FeO) = 1377^{\circ}C$. Всі ці оксиди запобігали плавленню компонентів шихти ПД між собою та разом з оболонкою. Аналіз фазових діаграм Fe-Mn, Fe-Si, Fe-B, Fe-C показав, що для інтенсифікації взаємодії компонентів шихти один з одним та зі

сталевою оболонкою необхідно додавати такі компоненти, як феросиліцій, феромарганець або феротитан, які утворюватимуть із залізом оболонки (або один з одним) низькоплавкі евтектики та сприятимуть взаємодії Cr та B₄C один з одним та зі сталевою оболонкою.

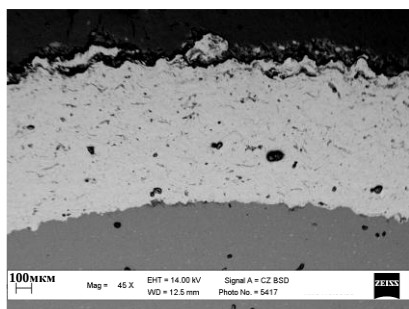
Таблиця 1. Тепловий ефект реалізації реакцій утворення карбідів та боридів та їх мікротвердість

Реакції утворення карбідів та боридів	Ентальпія ΔH_{298}° шихти ПД, кДж/г шихти	Мікротвердість боридів, ГПа
$7 \text{ Cr} + 2 \text{ B}_4\text{C} = 4 \text{ CrB}_2 + \text{Cr}_3\text{C}_2$ (1)	1,0	1600
$\text{Ti} + \text{B}_4\text{C} = \text{TiB}_2 + \text{TiC}$ (2)	3,3	2000
$\text{Fe} + 1/7 \text{ B}_4\text{C} = 4/7 \text{ FeB} + 1/7 \text{ Fe}_3\text{C}$ (3)	1,2	1400

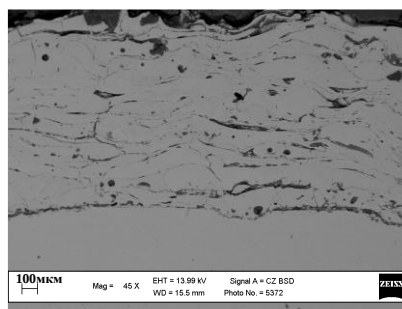
Для зменшення температури плавлення природніх оксидних плівок на компонентах шихти ПД до неї додавали буру (Na₂B₄O₇) або борний ангідрид (B₂O₃). Під час напилювання покриттів бура плавилась ($t_{\text{пл}}(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7) = 741^{\circ}\text{C}$) і розкладалась з утворенням метаборату натрію та борного ангідриду ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \rightarrow 2\text{NaBO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$). Останній взаємодівав з оксидами Cr₂O₃ та Fe₂O₃ з утворенням метаборатів FeBO₃ та CrBO₃ ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 2\text{FeBO}_3$; $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3 = 2\text{CrBO}_3$) з низькою температурою плавлення: $t_{\text{пл}}(\text{FeBO}_3) = 800^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{пл}}(\text{CrBO}_3) = 780^{\circ}\text{C}$. Бурі властива висока здатність розчиняти оксидні плівки на поверхні сталевій оболонки та часточках порошку Cr у шихті ПД. При цьому карбід бору повністю взаємодівав з Cr та сталевою оболонкою, сприяючи формуванню однорідніших покриттів з нанорозмірними виділеннями боридів. Це забезпечило зростання мікротвердості, абразивної зносостійкості та корозійної тривкості покриттів.

Евтектичні складові шихти ПД Fe-B, Fe-Si, Mn-Si та Fe-Ti, які мають низьку температуру плавлення (740–800 °C), призводить до утворення розплавленої ванни з низькою температурою плавлення в процесі ЕДП, що забезпечує плавлення тугоплавких компонентів шихти ПД (хром, B₄ C, ферохром, ферохромбор). Наявність евтектик у розплавленій ванні шихти ПД гарантує повне її сплавлення з оболонкою, утворення однорідного розплаву з якого утворюються краплини металу, що формують покриття.

Особливості структури ЕДП із ПД Fe-Cr-Si-Mn-B-C на сталевих та алюмінієвих підкладках. Незалежно від підкладки (алюміній чи сталь), покриття мало типову ламелярну структуру (рис. 1). У покритті на сталевій підкладці спостерігалися окремі мікротріщини, ймовірно, через вищі залишкові напруження розтягу I роду в цьому випадку порівняно з тими, що характерні для покриття на алюмінієвій підкладці.



а

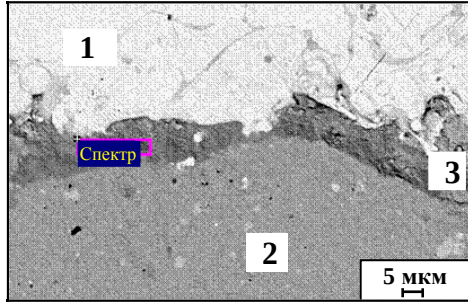


б

Рисунок 1. Типова структура покриттів, напилених ПД Fe-Cr-Si-Mn-B-C на алюмінієву (а) та сталеву(б) основи

Поверхня алюмінієвих сплавів завжди має природній оксидний шар з температурою плавлення 2050 °C. Цей шар запобігає сплавленню (ЕДП) з підкладкою. Екзотермічні реакції, що відбуваються між компонентами шихти ПД під час ЕДП,

призводять до підвищення температури в їх розплавлених краплях на 300–500 °С. Це сприяє плавленню природного оксидного шару на алюмінієвому сплаві та утворенню зони розплаву, яка може досягати 10 мкм завтовшки між ЕДП та алюмінієвою підкладкою. Спектральний аналіз зони розплаву підтвердив наявність у її складі алюмінію (з підкладки) та заліза, хрому, марганцю та кремнію (з ЕДП) (рис. 2). Адгезійна міцність нанесених покриттів збільшилася з 36 до 55 МПа. На сталевій підкладці ці зони плавлення були значно меншими через значно вищу температуру плавлення сталі порівняно з алюмінієвим сплавом.



Елемент	Ваговий %	Атомний %
O	6.20	13.15
Al	44.04	55.44
Si	1.68	2.04
Cr	2.42	1.58
Mn	1.65	1.02
Fe	44.01	26.77
Всього	100.00	

Рисунок 2. Зона сплавлення ЕДП із ПД 90Х6РГС з алюмінієвою основою.

1 – ЕДП 90Х6РГС; 2 – алюмінієвий сплав Д16; 3 – зона сплавлення.

Порівняння структури покриттів із ПД, напилених використанням до- та надзвукового повітряного струменів. Коли використовується надзвуковий струмінь повітря під тиском 1,2 МПа, порівняно з дозвуковим струменем під тиском 0,6 МПа, ЕДП нанесені на сталеві та алюмінієві підкладки, демонструють більш дисперсну структуру та зменшену пористість (рис. 3). Ламелі покриттів, нанесених надзвуковим напиленням, є більш плоскими та мають більше точок зварювання. Загалом, покриття, нанесені дозвуковим напиленням, мають більше мікротріщин, ніж покриття, нанесені надзвуковим напиленням (рис. 3а). Це пов'язано з вищою кінетичною енергією крапель розплавленого металу у надзвуковому струмені, а також з нижчими залишковими напруженнями розтягу I роду в покриттях.

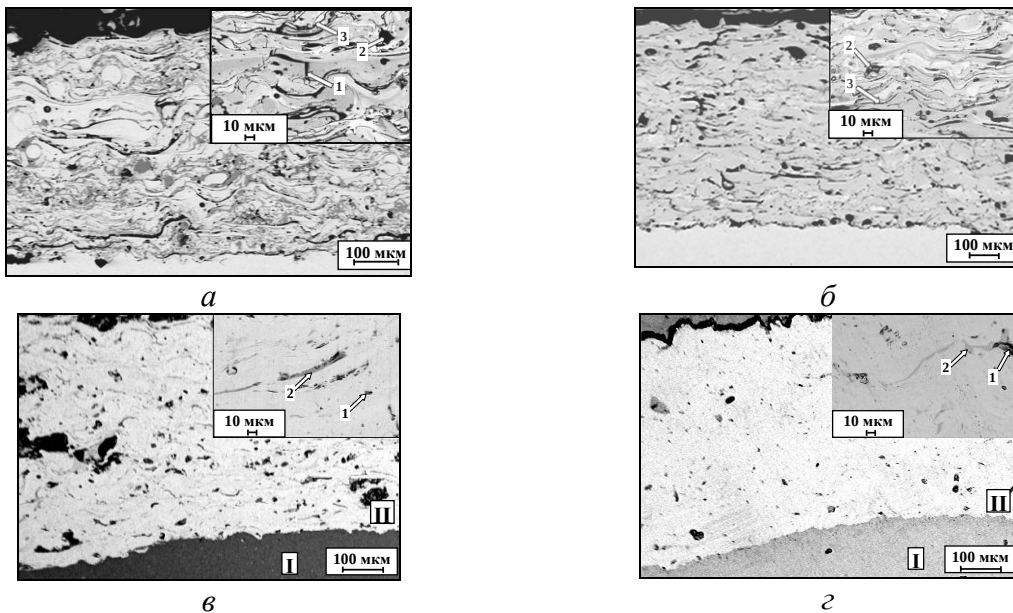


Рисунок 3. Структура ЕДП з ПД 90Х6Р2ГС, напилених за тиску повітряного струменя 0,6 (а, в) та 1,2 (б, г) МПа на сталеву (а, б) та алюмінієву (в, г) підкладки, 1 – мікротріщини; 2 – пори; 3 – оксидні плівки; I – основа; II – покриття.

Потужніший надзвуковий струмінь повітря інтенсивніше диспергував розплавлений метал ПД під час нанесення покриття. Одночасно утворювалася більша кількість дрібніших крапель розплавленого металу ПД з вищою кінетичною енергією. Таким чином, зі збільшенням тиску струменя повітря з 0,6 до 1,2 МПа максимальний діаметр крапель зменшився зі 150 до 30 мкм, а їхня швидкість на дистанції нанесення збільшилася зі 130 до 250 м/с (рис. 4). Однак вміст кисню в структурі покриття не перевищував 3% ні при дозвуковому, ні при надзвуковому варіанті струменя повітря.

Збільшення вмісту Cr від 6 до 17 мас.% у покритті з ПД, що містив 2 мас.% бору, практично не змінило його структури. У цих покриттях утворювалися мікротріщини, пори та оксидні плівки, однак застосування надзвукового режиму напилювання істотно зменшило їх кількість у структурі ЕДП.

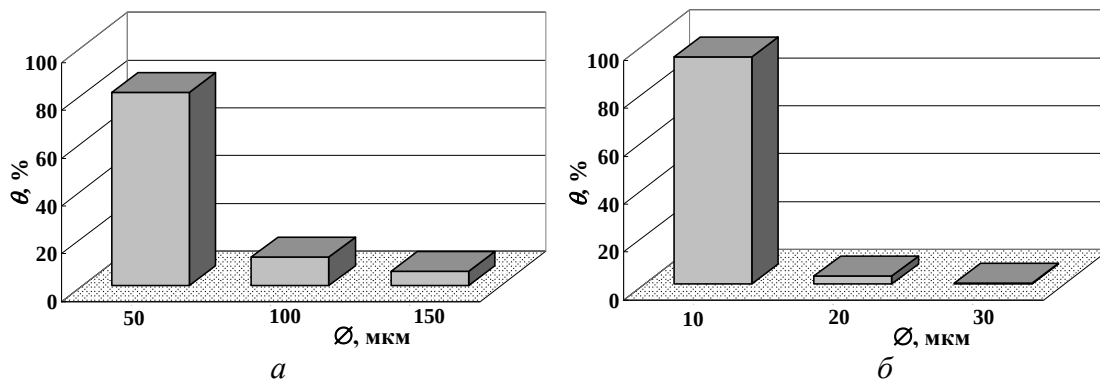


Рисунок 4. Розподіл крапель розплаву ПД 90Х6ГС за розмірами залежно від тиску повітряного струменя: а – 0,6 ; б – 1,2 МПа

Застосування для напилювання покриттів із ПД надзвукового повітряного струменя дало змогу зменшити розміри лемелей із краплин розплаву ПД, і як наслідок, пришвидшити їх кристалізацію на поверхні напилювання. При цьому бориди $\text{Fe}(\text{Cr})_2\text{B}$ у структурі покриттів диспергувалися від 500 до 200 нм (рис. 5).

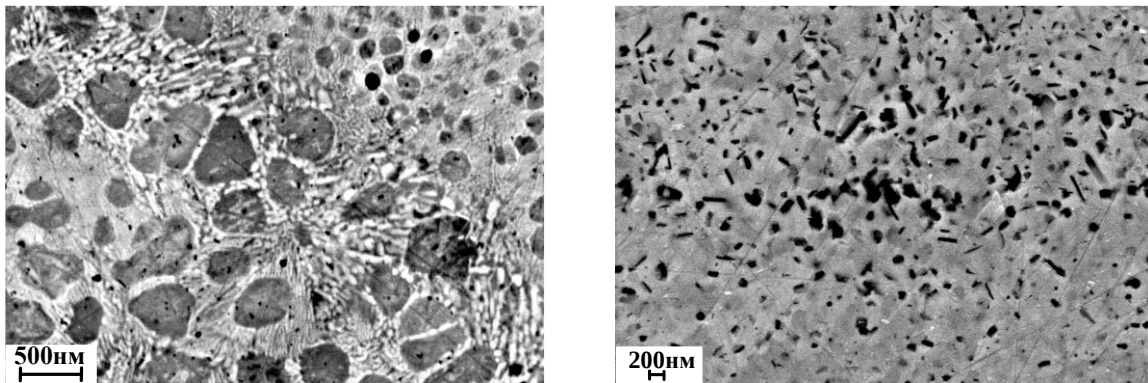


Рисунок 5. Виділення дрібнодисперсних боридів $\text{Fe}(\text{Cr})_2\text{B}$ у структурі покриття з ПД 90Х17Р2ГС, напиленого за дозвукового (0,6 МПа) (а) та надзвукового (1,2 МПа) (б) тиску повітряного струменя.

Висновки: використання надзвукового повітряного струменя в процесі електродугового напилювання покриттів зумовлює формування більш дисперсної структури та меншу кількість мікротріщин та пор. Екзотермічні реакції, які відбуваються між компонентами шихти ПД в процесі напилення ЕДП та підвищення кінетичної енергії розплавлених краплин за надзвукового режиму напилення, зумовлюють підвищення їх температури на 300...500 °С, та формування зон сплавлення покриття і алюмінієвої основи.