

УДК:621.793.7

## АНАЛІЗ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ РЕАКЦІЙ В ПРОЦЕСІ НАПИЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

**Н.М. Остапчук**, аспірант,

Національний лісотехнічний університет України,

**В.М. Гвоздецький**, канд. техн. наук, ст. досл. зав. лаб.

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

**І.М. Гончар**, канд. техн. наук, доцент

Національний лісотехнічний університет України

**С.І. Маркович**, канд. техн. наук, доц.

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Постановка проблеми.** Метод електродугового напилення (ЕДН) покриттів знайшов широке застосування в різних областях промисловості. Значне використання цього можливостей методу досягається застосуванням спеціальних порошкових електродних дротів (ПД) для напилення, які дозволяють підвищити адгезійну міцність, твердість, зносостійкість, триботехнічні і антикорозійні властивості покриттів до рівня плазмових покриттів, але при набагато менших затратах [1-3]. Однак недостатня вивченість процесів формування покриттів із порошкових дротів та їх впливу на структурно-фазовий склад і механічні характеристики стримує їх використання, звужуючи можливості метода електродугового напилення [3, 4]. В даній роботі досліджено впливу складу шихти на властивості покриттів із ПД.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод електродугового напилення (ЕДН рис.1) є найбільш технологічним й у 3-5 разів дешевшим відносно інших методів та не потребує дороговартісного обладнання [5-7].

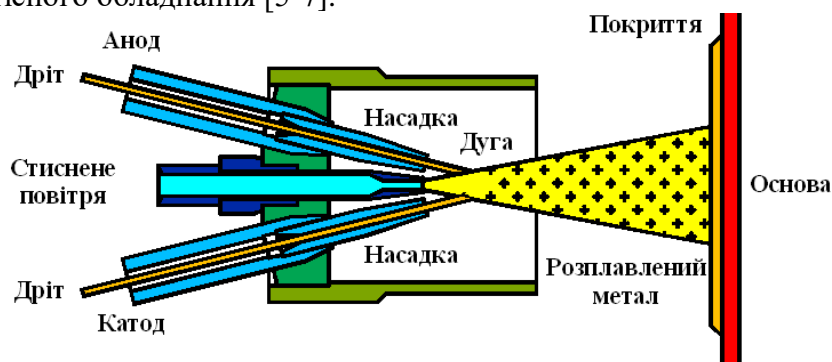
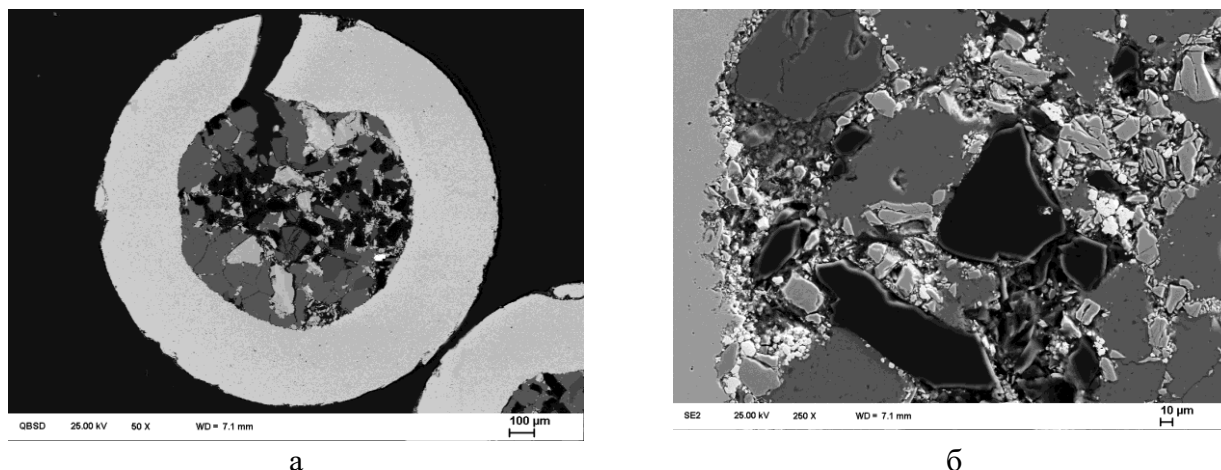


Рисунок 1 - Типова схема формування електродугових покриттів

Спеціальні порошкові дроти (ПД рис. 2) для ЕДН із екзотермічною шихтою забезпечили отримання зносостійких покриттів із твердістю до 12 ГПа, міцністю зчеплення із сталлюю та алюмінієвою основою до 50 МПа, абразивною зносостійкістю на рівні сталі із твердістю 9 ГПа та товщиною до 5 мм [8, 9].

Використання надзвукового повітряного струменю підвищило ці характеристики ще на 20-30 % [7-10]. Застосування ПД із екзотермічною шихтою зумовлює підвищення температури розпиленних краплин на дистанції напилення покриттів та формування боридів і карбідів, які необхідні у їх структурі для забезпечення високої зносостійкості.



а

б

Рисунок 2 - Структура порошкових дротів із шихтою Cr+V<sub>4</sub>C+Al за різного збільшення (поперечне січення ПД). Чорні зерна – карбід бору

**Постановка завдання.** Метою дослідження є вибір оптимального складу порошкових дротів шляхом аналіз екзотермічних реакцій в процесі напилення.

Об’єкт дослідження: процес формування термодинамічних умов при спрацювання та послідуочого зміцнення поверхонь лемішів відвальних плугів.

Предмет дослідження: залежності характеристик ЕДП від термодинамічних процесів і реакцій при ЕДН ПД.

**Виклад основного матеріалу.** В даній роботі проведено термодинамічний аналіз екзотермічних реакцій, які відбуваються в процесі ЕДН покриттів за використання ПД із шихтою Cr+V<sub>4</sub>C+Al, Ti+V<sub>4</sub>C+Al та V+V<sub>4</sub>C+Al.

В процесі напилення покриттів відбуваються реакції окиснення компонентів шихти із виділення великої кількості теплової енергії табл. 1. Як свідчить спектральний аналіз ЕДН покриттів кількість кисню у них коливається від 12% мас. (без алюмінію у складі ПД) до 2% мас. (при наявності алюмінію у ПД). Реакції окиснення краплин на дистанції напилення покриттів є небажані, так як це формує між ламелярні оксидні прошарки і внаслідок цього зменшується когезія покриттів. Найбільше теплової енергії при ЕДН виділяється при окисненні алюмінію, трохи менше – титану та ванадію і значно менше заліза. Як свідчать експериментальні дані в процесі напилення покриттів із ПД краплини алюмінію та хрому або краплини сплавів легованих алюмінієм та хромом швидко покриваються щільною оксидною плівкою із оксиду алюмінію та оксиду хрому. Тому значно зменшується кількість оксидної фази. В той же час титан та ванадій інтенсивно реагують із киснем повітря з утворенням рихлих оксидів. Це може привести до відшаровування оксидної плівки або швидкого випаровування рідких оксидів, що зумовлює значні втрати титану або ванадію в процесі напилення покриттів. Тому при формуванні ПД із шихтою на основі титану або ванадію необхідно до неї додавати порошок алюмінію. Це зменшить втрати ванадію, внаслідок утворення легованих оксидів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхні розплавлених краплин в процесі напилення покриттів із ПД.

Таблиця 1 - Ентальпія реакцій окиснення

Реакція окислення	Ентальпія $\Delta H_{298}^{\circ}$ , кДж/г шихти ПД
$2Al + 2/3 O_2 = Al_2O_3$	16,6
$Ti + O_2 = TiO_2$	11,6
$2V + 2/5 O_2 = V_2O_5$	10,5
$2Fe + 2/3 O_2 = Fe_2O_3$	5,1

В процесі ЕДН покриттів із ПД, що містять шихту Cr+V<sub>4</sub>C, Ti+V<sub>4</sub>C, та V+V<sub>4</sub>C у розпиленних краплинах на дистанції напилення відбуваються екзотермічні реакції із утворенням карбідів та боридів табл. 2. В процесі взаємодії титану та ванадію із карбідом бору виділяється втричі більше теплоти ніж при взаємодії хрому із карбідом бору:

Таблиця 2 - Ентальпія реакцій окиснення

Реакції утворення карбідів та боридів	Ентальпія $\Delta H_{298}^{\circ}$ , кДж/г шихти ПД
$7Cr + 2V_4C = 4CrB_2 + Cr_3C_2$	1,1
$3Ti + V_4C = 2TiB_2 + TiC$	3,4
$3V + V_4C = 2VB_2 + VC$	3,1

Термодинамічний аналіз показує, що в процесі ЕДН покриттів найбільш імовірними реакціями будуть окиснення алюмінію, титану та ванадію. Імовірність реакцій взаємодії титану із карбідом бору є суттєво вищою ніж та ванадію, хрому та заліза із карбідом бору табл.3 [3].

Таблиця 3 - Енергія Гіббса реакцій взаємодії заліза, ванадію, хрому та титану із карбідом бору в процесі ЕДН на дистанції напилення покриттів

Рівняння реакції	$\Delta G_{800}^{\circ}$ , кДж/моль Ме	$\Delta G_{1200}^{\circ}$ , кДж/моль Ме
$Fe + 1/7 V_4C = 4/7 FeB + 1/7 Fe_3C$	-54,2	-42,4
$Cr + 2/7 V_4C = 4/7 CrB_2 + 1/7 Cr_3C_2$	-75,4	-67,8
$5V + V_4C = 4VB_2 + VC$	-68,3	-57,4,2
$Ti + 1/3 V_4C = 2/3 TiB_2 + 1/3 TiC$	-223,1	-218,1
$Cr + 3/4 O_2 = 1/2 Cr_2O_3$	-463,3	-414,1
$Al + 3/4 O_2 = 1/2 Al_2O_3$	-706,9	-637,9
$Ti + O_2 = TiO_2$	-425,1	-387,8

В процесі ЕДН екзотермічні реакції, які відбуваються між компонентами шихти дроту суттєво підвищують температуру краплин. Так при ЕДН покриттів із суцільного дроту Св08А температура краплин заміряна калометричним способом становила 1650<sup>0</sup>С на дистанції напилення 120 мм. Температура краплин розпиленних з ПД із шихтою Cr + V<sub>4</sub>C + Al становила 2000<sup>0</sup>С. Суттєво вища температура краплин 2200<sup>0</sup>С зафіксована для краплин з ПД із шихтою Ti + V<sub>4</sub>C + Al та V + V<sub>4</sub>C + Al.

#### Висновки.

1. В процесі ЕДН покриттів із ПД, що містять шихту Cr+V<sub>4</sub>C, Ti+V<sub>4</sub>C, та V+V<sub>4</sub>C у розпиленних краплинах на дистанції напилення відбуваються екзотермічні реакції із утворенням карбідів та боридів.

2. В процесі ЕДН покриттів найбільш імовірними реакціями будуть окиснення алюмінію, титану та ванадію. Імовірність реакцій взаємодії титану із карбідом бору є суттєво вищою ніж та ванадію, хрому та заліза із карбідом бору

3. В процесі ЕДН екзотермічні реакції, які відбуваються між компонентами шихти дроту суттєво підвищують температуру краплин. Температура краплин розпиленних з ПД із шихтою Cr + V<sub>4</sub>C + Al становила 2000<sup>0</sup>С. Вища температура краплин 2200<sup>0</sup>С зафіксована для краплин з ПД із шихтою Ti + V<sub>4</sub>C + Al та V + V<sub>4</sub>C + Al, при цьому при ЕДН суцільного дроту Св08А температура краплин становила 1650<sup>0</sup>С.

#### Список літератури

- Газотермічні покриття, Г.В. Похмурська, М.М. Студент, В.І. Похмурський, навчальний посібник, Львів 2017, ТзОВ «Простір-М», 179 с.

2. Hvozdetzkyi V.M., Student O.Z., Student M.M., Pokhreluyuk I.M., Zadorozna Kh.R., Lukyanenko A.G. Physicomechanical properties of arc sprayed coating formed in supersonic mode. *Materials Science*. 2024. Vol. 60, Is. 2. P. 189–197. Sichen, D. Standard gibbs energies of formation of the carbides of vanadium by emf measurements. *Metall Trans B* 21, 313–320 (1990).
3. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / Student, M.M., Markovych, S.I., Hvozdetzkyi, V.M., Kalakhan, O.S., Yuskiv, V.M. // *Materials Science*, 2022, 58(1), pp. 96–104.
4. Вплив діаметра електродних порошкових дротів на механічні характеристики електродугових покриттів / Студент М.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 32-44.
5. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів / М.М. Студент та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. № 1. С. 90-97.
6. Гвоздецький В. М., Студент М. М., Задорожна Х. Р., Веселівська Г. Г., Маркович С. І., Мозола Н. З. Механічні характеристики електродугових покриттів, напилених на підкладки зі сталі Ст3 та алюмінієвого сплаву Д16. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2025. Т. 61, № 2. С. 14-22.
7. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires./ Student Mykhailo, Gvozdetzky Volodymyr, Student Oleksandra, Prentkovskis Olegas, Maruschak Pavlo, Olenyuk Olena, Titova Liudmyla. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering* 69(4):133-146 December 2019
8. Маркович С.І. Дослідження зв'язку зносостійкості з фізико-механічними властивостями покриттів, нанесених електродуговим напиленням різнорідних дротів // *Проблеми тертя та зношування*. – Київ, 2007. - №46. С. 16-18.
9. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький [та ін.]. - Львів : Простір-М, 2018. - 335 с
10. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / Pokhmurskyi V. I. et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22. P. 34-41