

УДК:621.793.7

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ НАПИЛЕНИХ РІЗНОТИПНИМИ ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ

Н.З. Мозола, аспірант,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
В.М.Гвоздецький, канд. техн. наук, ст. досл, зав. лаб.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
С.І. Маркович, канд. техн. наук, доц.
Центральноукраїнський національний технічний університет
М.М. Студент, проф., д.т.н.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
Х.Р. Задорожна стар. наук. співроб., к.т.н.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

Постановка проблеми. Електродугове напилювання покриттів поширене у багатьох галузях промислового виробництва, зокрема для відновлення геометрії зношених в експлуатаційних умовах деталей машин, для підвищення їх захисту від абразивного та газоабразивного зношування (причому, і за кліматичних, і за технологічно обумовлених підвищених температур) [1-3]. Як правило, напилювання суцільними, однорідними за хімічним складом дротами дає змогу отримати достатньо гомогенні за хімічним складом електродугові покриття (ЕДП). Проте за їх хімічним складом такі ЕДП істотно відрізняються від використаного для розпилення дроту. Цьому сприяє інтенсивне вигорання наявних у краплинах розплаву суцільного дроту вуглецю, випаровування таких елементів як Zn, Mn, Cr (з високою пружністю дисоціації їх парів) та оксидування через легке окиснення таких складників як Al, Ti, Cr і Fe [3-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Покриття, напилені із використанням порошкових дротів (ПД), відзначаються високою хімічною неоднорідністю, що істотно відрізняє їх від ЕДП із суцільних дротів. Це зумовлено різним хімічним складом краплин, що утворюються із розплаву ПД та переносяться струменем повітря до поверхні підкладки, формуючи на ній покриття. Неповне сплавлення шихти ПД зі сталеву оболонкою під час електродугового напилювання ЕДП зумовлює таку їх гетерогенність. Адже ванна розплавленого металу між торцями ПД миттєво (впродовж часу, сумірного часткам секунди) подрібнюється повітряним струменем на дрібні краплі розплаву і завдяки високому тиску повітря переміщується до поверхні для напилювання. Тому шихта з елементами легування у її складі (у тому числі у важко плавкими такими як ФХ, В₄С, ФХБ не встигає повною мірою розплавитися і перемішатися з розплавом сталеву оболонки. Зрозуміло, що через це дисперговані повітряним струменем краплини розплаву ПД матимуть різний хімічний склад і, як наслідок, покриття, утворені з цих краплин на поверхні підкладки, будуть характеризуватися високою неоднорідністю та значною хімічною гетерогенністю. Зрозуміло, що хімічна гетерогенність отриманих ЕДП впливатиме на їх фізико-механічні властивості [5-7].

Застосування різнорідних ПД відкриває широкі можливості для підвищення механічних характеристик ЕДП, так як урізноманітнення складу шихти надає можливість розробки різноманітного типу реакцій в процесі плавлення [7-10]. Дослідження впливу цих

реакцій на процес формування покриттів для підвищення якості ЕДП відноситься до завдань, важливих і актуальних в багатьох застосунках.

Постановка завдання. Мета дослідження – розробка ефективного технологічного методу для підвищення механічних та трибологічних характеристик електродугових покриттів (ЕДП)

Об'єкт дослідження: процес формування ЕДП ПД різномірної складу.

Предмет дослідження: залежності властивостей ЕДП від складу шихти ПД

Виклад основного матеріалу. Для покращення механічних та трибологічних характеристик електродугових покриттів (ЕДП), які використовуються для відновлення деталей автомобілів, запропоновано наносити покриття на зношені поверхні за напилення різних типів порошкових дротів (ПД). До шихти одного з них входила значна кількість алюмінію та бору (ПД60Cr6V3Al6), що забезпечило напиленому покриттю високу твердість (~ 800) $HV_{0,1}$. Водночас як інша шихта не містила алюмінію (ПД60X6B2M2T2) і це сприяло формуванню в покритті мартенситної матриці з низьким рівнем залишкових напружень та меншою твердістю (~ 600) $HV_{0,1}$. Під час нанесення ЕДП на поверхні сталеві підкладки кристалізувалися краплі розплавленого металу від кожного типу дроту. На межах між краплями розплавленого металу, що відрізнялися за складом, виникли сприятливі умови для протікання екзотермічної та алюмінотермічної реакції на мікрорівні. Це полегшило зварювання ламелей як з підкладкою, так і з суміжними ламелями. Очікувалося, що такі композиційні покриття, отримані шляхом кристалізації розплавлених крапель різного складу, дадуть змогу значно покращити його фізико-механічні та зносотривкі характеристики. Для цього використовувався електродуговий металізатор, розроблений у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України (рис. 1). Цей металізатор давав змогу отримувати ЕДП з високою адгезійною міцністю та низькою пористістю. У його конструкції використано сопло Лавалю з двома діагонально протилежними повітряними каналами (рис. 1), що забезпечило формування повітряного струменю з надзвуковою швидкістю (число Маха дорівнювало 2). Характерні розміри такого сопла були розраховані за формулами, описаними раніше [1].

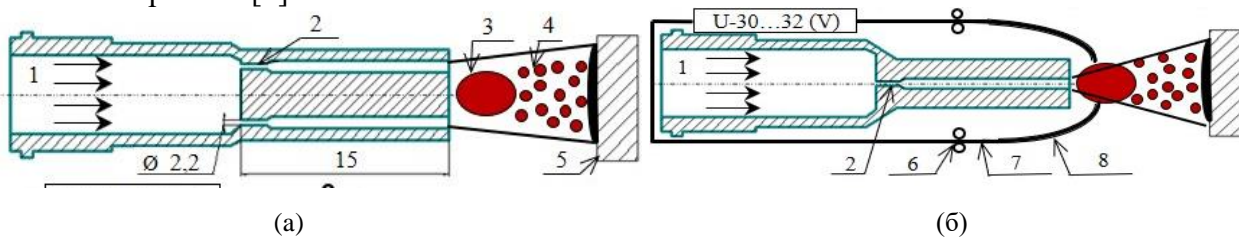
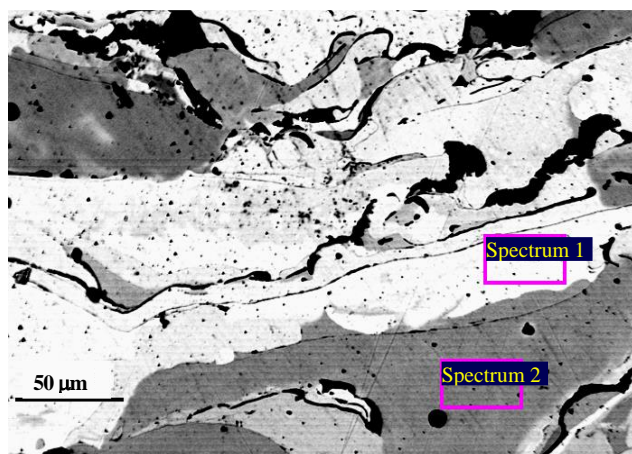


Рисунок 1 - Схематичні зображення поперечного перерізу сопла металізатора для формування надзвукового повітряного потоку під час напилювання (вигляд спереду (а) і зверху (б) відповідно): 1 - повітряний потік, 2 - критичний переріз сопла, 3 - розплав електродних матеріалів, 4 - металоповітряний потік, 5 - сталеві підкладки з напилюваним покриттям

У структурі покриття, розпиленого такими ПД, значно зменшилася кількість і товщина міжламелярних оксидних плівок (рис. 2). Вважали, що під час кристалізації крапель розплаву обох ПД різного складу на межах різномірних ламелей виникали сприятливі умови для екзотермічних та алюмотермічних реакцій. Це повинно полегшити зварювання різномірних ламелей між собою на мікрорівні.



а

Spectrum 1		Spectrum 2	
Елемент	Ваговий %	Елемент	Ваговий %
Al K	0.31	Al	12.61
Ti K	1.01	Cr	5.13
Cr K	6.38	Fe	82.26
Fe L	87.48	Разом	100.00
Mo L	1.86		
W M	2.96		
Разом	100.00		

б

Рисунок 2 - Структура покриття із різнотипних дротів (ПД60Cr6B3Al6 + ПД60X6B2M2T2)-а) та спектральний аналіз ламелей із різнотипних дротів-б)

Темні ламелі в мікроструктурі покриття утворені краплями розплаву ПД 60Cr6B3Al6, які окрім хрому містять також алюміній, що є ефективним стабілізатором фериту. А світлі ламелі - це кристалізовані краплі розплаву ПД60X6B2M2T2, до складу якого, окрім хрому, входять вольфрам, молібден і титан. Це забезпечило формування ламелей зі структурою мартенситу. Як правило, на межі розділу між ламелями різного складу оксидних плівок не виявляли (рис. 2). Це вважалося ознакою міцного зварювання таких ламелей між собою за рахунок додаткового тепловиділення під час екзотермічних реакцій між компонентами ПД з шихтою різного складу. Дійсно, плівка тугоплавкого оксиду алюмінію (Al_2O_3) на поверхні крапель розплаву ПД 60Cr6B3Al6 руйнувалася при їх зіткненні з раніше доставленими і, отже, більш холодними краплями розплаву ПД60X6B2M2T2. Це забезпечило доступ алюмінію з розплаву до оксидної плівки на поверхні крапель розплаву ПД 90X6ГС. В результаті оксиди заліза легко відновлювалися алюмінієм, а додаткова кількість тепла, що виділялася при цьому, сприяла щільному зварюванню крапель розплаву ПД різного складу між собою. Передбачалося, що виявлені структурні особливості покриття, напиленого ПД різного складу, повинні суттєво покращити його Формування покриттів за попарного поєднання ПД різних типів (ПД 60Cr6B3Al6 + ПД60X6B2M2T2) під час напилювання дало змогу суттєво підвищити когезійну міцність отриманого композиційного покриття порівняно з покриттями з пар ПД одного типу (табл. 1).

Таблиця 1 – Фізико - механічні властивості ЕДП, напилених парою ПД з однаковим або різним складом шихти.

Механічні властивості	ПД для електродугового напилювання		
	ПД60Cr6B3Al6 + ПД60Cr6B3Al6	ПД60X6B2M2T2 + ПД60X6B2M2T2	ПД60Cr6B3Al6 + ПД60X6B2M2T2
Адгезійна міцність $\sigma_{ад}$, МПа	44 ± 2	22,5 ± 2	46,5 ± 2
Когезійна міцність $\sigma_{ког}$, МПа	98,5 ± 6,5	146, 5 ± 3,5	220 ± 10
Залишкові напруження $\sigma_{зал}$, МПа	65,5 ± 4,5	12,5 ± 2,5	38,5 ± 3,5
Мікротвердість HV _{0,1}	800 ± 200	575 ± 75	750 ± 250
Фазовий склад покриття	α -Fe, Fe ₂ B, FeB, Fe ₂ O ₃ , сліди Cr ₂ O ₃ , B ₂ O ₃	α -Fe, Fe ₃ C, сліди Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ ,	α -Fe, Fe ₂ B, FeB, Fe ₂ O ₃ , сліди Cr ₂ O ₃

Важливо, що адгезійна міцність композиційного покриття зайняла проміжне положення між значеннями цього показника для покриттів, напилених однотипними ПД. Зокрема, адгезійна міцність композиційного покриття більш ніж в 1,6 рази перевищувала найнижче значення $\sigma_{ад}$ покриття, напиленого ПД90Х6ГС, при формуванні якого оксиди на поверхні крапель розплаву перешкоджали їх зварюванню з підкладкою. Однак адгезійна міцність композиційного покриття була лише на 7% нижчою, ніж у покриття, напиленого парою однотипних ПД 60Cr6В3А16 з максимальним значенням $\sigma_{ад}$. Виходячи з цього, вважали, що прийнятної адгезії композиційного покриття до підкладки досягли завдяки використанню ПД 60Cr6В3А16. Алюміній у складі крапель його розплаву забезпечив протікання алюмотермічних реакцій відновлення оксидів на напилюваній поверхні та їх міцне зварювання. Менша кількість крапель розплавів ПД 60Cr6В3А16 за напилювання двох різних типів ПД, ніж при напиленні парою однотипних ПД, пояснила зниження адгезії композиційного покриття до підкладки.

Висновки.

1. Застосування в шихті ПД60Cr6В3А16 значної кількості алюмінію та бору забезпечує в ЕДП напиленому покриттю високу твердість близько 800 HV_{0,1}.
2. Шита ПД60Х6В2М2Т2 сприяє формуванню в покритті мартенситної матриці з низьким рівнем залишкових напружень та меншою твердістю близько 600 HV_{0,1}.
3. У структурі покриття ЕДП, сформованого такими ПД, значно зменшилася кількість і товщина міжламельних оксидних плівок за рахунок екзотермічних та алюмотермічних реакцій.
4. Адгезійна міцність ЕДП більш ніж в 1,6 рази перевищувала найнижче значення $\sigma_{ад}$ покриття, напиленого ПД90Х6ГС, при формуванні якого оксиди на поверхні крапель розплаву перешкоджали їх зварюванню з підкладкою. Таким чином застосування різномісних ПД для ЕДП суттєво підвищує когезійну міцність та зменшує рівень залишкових напружень розтягу у напилених покриттях.

Список літератури

1. Student M., Gvozdetsky V., Student O., Prentkovskis O., Maruschak P., Olenyuk O., Titova L. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires. *Strojnický časopis – J. Mech. Engin.* 2019, 69(4), P. 133–146.
2. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / Student, M.M., Markovych, S.I., Hvozdetskyi, V.M., Kalakhan, O.S., Yuskiv, V.M. // *Materials Science*, 2022, 58(1), pp. 96–104.
3. 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.
4. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів / М.М. Студент та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. № 1. С. 90-97.
5. 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.
6. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires./ Student Mykhailo, Gvozdetsky Volodymyr, Student Oleksandra, Prentkovskis Olegas, Maruschak Pavlo, Olenyuk Olena, Titova Liudmyla. *Strojnický časopis - Journal of Mechanical Engineering* 69(4):133-146 December 2019
7. Маркович С.І. Дослідження зв'язку зносостійкості з фізико-механічними властивостями покриттів, нанесених електродуговим напиленням різномісних дротів // *Проблеми тертя та зношування*. – Київ, 2007. - №46. С. 16-18.
8. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький [та ін.]. - Львів : Простір-М, 2018. - 335 с
9. 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
10. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / Stupnyts'kyi T.R. et al. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, № 2. P. 165–172.