

УДК 621.793.72

Володимир Гвоздецький, к.т.н., с.досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.;  
Олександра Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н.; Олександр  
Лук'яненко, к.т.н.; Нестор Мозола

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

## ТОПОГРАФІЯ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ РІЗНОГО СКЛАДУ І ЇЇ ВПЛИВ НА МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ

Анотація. Проаналізовано топографію поверхонь електродугових покриттів, напилених порошковими дротами з різним складом шихти. Показано, що оксиди елементів легування з різною твердістю визначала шорсткість поверхні покриттів та механізм їх зносу за тертя.

Ключові слова: електродугове напилювання, порошкові дроти, покриття, шорсткість поверхні, оксиди елементів, механізм зношування

Volodymyr Hvozdet's'kyi, Ph.D.; Mykhailo Student, Ph.D., Prof.; Oleksandra Student, Ph.D., Prof.; Khrystyna Zadorozhna, Ph.D.; Oleksandr Lukyanenko, Ph.D.; Nestor Mozola

## TOPOGRAPHY OF THE SURFACE OF ARC COATINGS SPRAYED WITH THE CORED WIRES OF DIFFERENT COMPOSITIONS AND ITS INFLUENCE ON THE WEAR MECHANISM

Abstract. The topography of the surfaces of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions is analyzed. It was shown that oxides of alloying elements with different hardness determined the roughness of coating surfaces and the mechanism of their wear during friction.

Keywords: arc spraying, cored wires, coatings, surface roughness, element oxides, wear mechanism.

**Вступ.** Електродугові покриття (ЕДП) із порошкових дротів (ПД) широко використовують для відновлення деталей типу «вал», експлуатованих за високих питомих навантажень в умовах граничного мащення. Серед газотермічних методів отримання покриттів найпоширенішим є електродуговий метод (ЕДМ) напилювання [1–4]. До переваг ЕДМ порівняно з іншими газотермічними методами відносять простоту технологічного процесу, мінімальні затрати та висока його продуктивність, можливість сформуванню напиленого шару необхідної товщини (у діапазоні 0,1...10 мм) з необхідними властивостями та незначне нагрівання деталей (до 150°C). Отже ЕДМ дає змогу відновити розміри зношених деталей та підвищити їх зносостійкість. Чистота шліфованої поверхні ЕДП визначає довговічність пари тертя. Звідси мета роботи – виявити, як компоненти шихти ПД впливатимуть на стан шліфованої поверхні ЕДП.

**Методика напилення електродугових покриттів із порошкових дротів.** Для напилювання ЕДМ використали електрометалізатор (рис. 1а) та ПД діаметром 1,8 мм, до шихти яких додавали порошки феросплавів (FeSi, FeTi, FeMn), чистих металів (Al, Cr) та карбиду В<sub>4</sub>С, а оболонку виготовляли зі стрічки шириною 10 мм із сталі 08кп товщиною 0,4 мм. Поперечний переріз ПД показано на (рис. 1б). Коефіцієнт заповнення ПД шихтою досягав 24%. Режим напилювання покриття: струм – 150 А, напруга – 32 В, тиск повітряного струменю 0,6 МПа, дистанція напилювання 120 мм.

**Експериментальні результати.** Під час розроблення ПД для напилювання ЕДП дослідили вплив компонентів шихти ПД на топографію поверхні одержаних покриттів після її шліфування. Адже чистота та шорсткість поверхні визначають трибологічні властивості пар тертя (зокрема деталей типу «вал – контргіло»). Електронно-мікроскопічні дослідження шліфованої поверхні ЕДП за невисокої роздільної здатності

виявили на ній велику кількість різних за розмірами впадин у вигляді пор (рис. 2а), а за вищої – виступів (рис. 2б), що суттєво відрізняло її від поверхні сталі ШХ15 (рис. 2в).

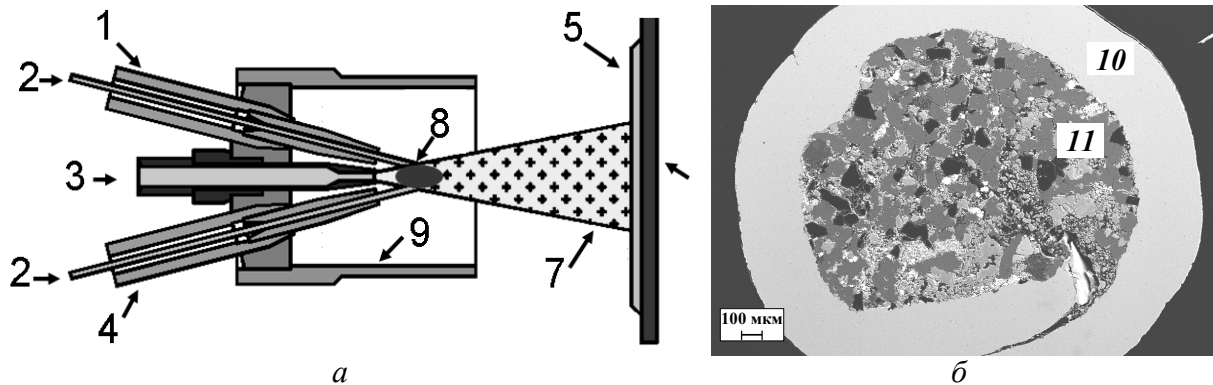


Рис. 1. Типова схема металізатора для ЕДН покриттів (а) та поперечний переріз ПД (б): 1 – катод; 2 – ПД; 3 – стиснене повітря; 4 – анод; 5 – покриття; 6 – підложка; 7 – розплавлений метал; 8 – дуга; 9 – захисний кожух; 10 – оболонка; 11 – шихта.

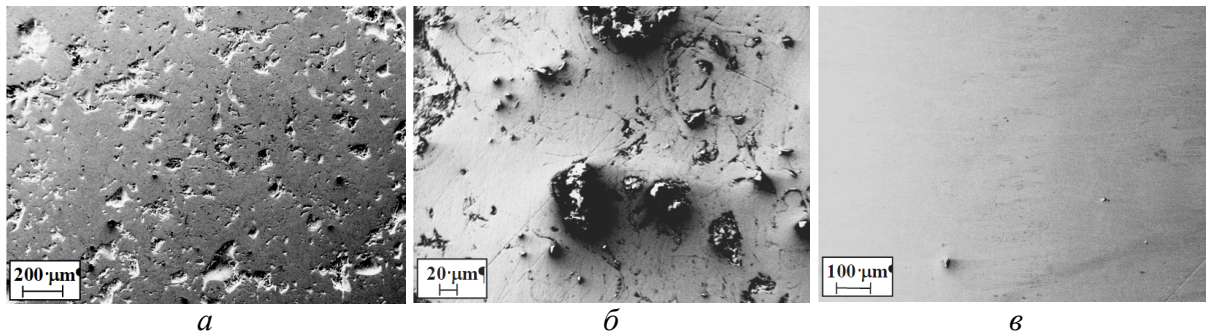


Рис. 2. Поверхні ЕДП із ПД 150Х6Р2ФМВ4 (а, б) та гартованої сталі ШХ15 (в) після шліфування та полірування. Впадини (а) та виступи (б) на поверхні ЕДП.

Таку топографію поверхні ЕДП пов'язали з його ламелярною структурою. Адже ламелі ЕДП, як правило, мають різний хімічний склад та мікротвердість. В матричній фазі покриттів попри включення карбідів і боридів виявляли ще з значну кількість оксидів заліза та легувальних елементів, які розташовувалися у структурі покриття переважно вздовж меж ламелей. Все це високоміцні, але водночас крихкі складові покриття, які легко руйнуються і вищерблюються під час механічної обробки, полишаючи по собі впадини. Але водночас незруйновані високо тверді виступи на поверхні ЕДП сприяють інтенсивному зношуванню поверхні фрикційної пари шляхом її шаржування. Зрозуміло, що після однакової механічної обробки (шліфування з наступним поліруванням) шорсткість поверхні ЕДП, напиленого ПД Х6Р3Ю6, була значно вищою ( $R_a$  1,88), ніж властива гартованій сталі ШХ15 ( $R_a$  0,88). Так після такої механічної обробки на поверхні ЕДП фіксували виступи до 1 мкм заввишки та западини до 1,6 мкм в глибину. Тоді як на сталевій поверхні вони не перевищували 0,25 мкм (рис. 3). Неоднорідна топографія поверхні покриття має як недоліки, так і переваги. За умов граничного тертя за високих питомих навантажень виявлені виступи можуть виконувати роль ріжучих крайок, що спричиняє катастрофічний знос матеріалу контртіла та вихід із ладу пари тертя. Проте впадини та порожнини на його поверхні виконують роль своєрідних “резервуарів” для мастила, яке потрапляючи в зону тертя, збільшує товщину граничної плівки мастила. Внаслідок цього за недостатньої кількості мастила в зоні тертя таке покриття може працювати краще.

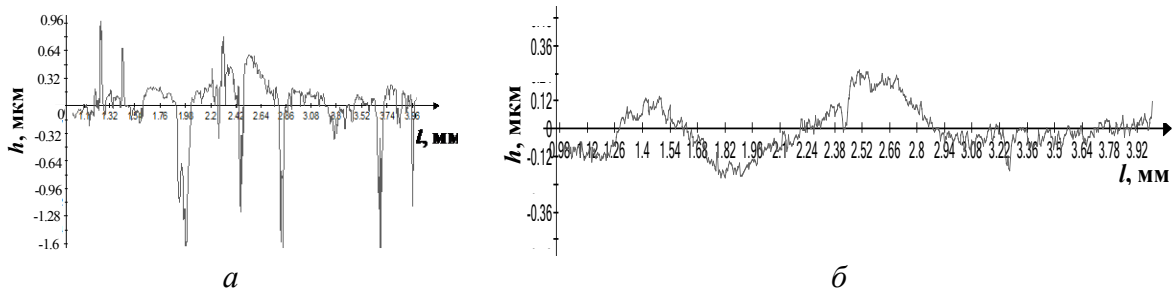


Рис. 3. Профілограми поверхонь ЕДП з ПД Х6РЗЮ6 з шорсткістю  $R_a$  1,88 (а) та сталі ШХ15 з шорсткістю  $R_a$  0,88 (б) після їх шліфування і полірування. По осі ординат відкладено перепад висот рельєфу  $h$  на поверхнях, а по осі абсцис – довжину шляху  $l$ , на якому здійснювались заміри.

Характер фрикційної взаємодії шліфованої поверхні покриття з контртілом визначається співвідношенням глибини врізання виступу в поверхню контртіла ( $h$ ) до радіуса заокруглення його гострої вершини ( $r$ ). Так, за співвідношення  $h/r < 0,02$  відбувається тільки пружна взаємодія виступу на поверхні ЕДП з поверхнею контртіла з подальшим пружним відскоком деформованого шару. Тоді як за  $0,02 < h/r < 0,7$  такі виступи спричиняють пластичну деформацію контртіла. І лише тоді, коли  $h/r > 0,7$  гострі виступи врізаються в поверхню контртіла, зрізуючи її з утворення мікростружки.

Встановлено що, як правило, в парі тертя “ЕДП – бронза БРС-30” максимальне питоме навантаження в умовах граничного мащення не перевищує 14 МПа. За вищих навантажень відбувається катастрофічний знос контртіла внаслідок зрізання його поверхні гострими виступами оксидів, карбідів або боридів із утворенням мікростружки. Тому зменшення кількості великих включень оксидів, карбідів і боридів у структурі покриттів та розмірів цих включень загалом, а також збільшення радіусів заокруглення їх вершини є однією з головних завдань з підвищення зносостійкості пар тертя “ЕДП – контртіло” в умовах граничного мащення.

**Хімічний склад виступів на шліфованій поверхні після її полірування.** При напилюванні ЕДП розплавлений в дузі ПД струменем повітря диспергується на краплини різного розміру (рис. 4а), які інтенсивно взаємодіють з наявним в атмосфері киснем. Металографічний аналіз краплин розплаву ПД, вловлених у снігову мішень, підтвердив наявність у метало-повітряному потоці краплин з різним ступенем окиснення (рис. 4б).

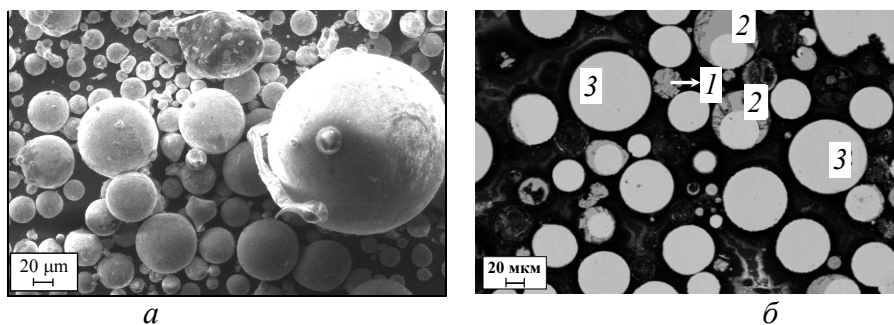


Рис. 4. Морфологічні особливості (а) та поперечний переріз краплин (б) із ПД 60Х6РЗЮ6, вловлених у снігову мішень для пришвидшення їх кристалізації. 1, 2, 3 – краплини відповідно з повним або частковим окисненням поверхні, або за його відсутності.

Згідно термодинамічного аналізу алюміній найшвидше взаємодіє з киснем, формуючи в покритті крупні включення оксиду алюмінію з високою мікротвердістю (20 ГПа). За наявності у складі шихти ПД значної кількості Cr в покритті формувались оксиди хрому з ще вищою мікротвердістю (30 ГПа) (рис. 5а). Однак у більшості випадків у покритті формувались складні оксиди із суміші оксидів Fe та Cr. Під час шліфування таких покриттів корундовим абразивним кругом (20 ГПа) на їх поверхні формувались виступи, які за високих питомих навантажень виконували роль різців.

Оскільки тверді включення оксиди хрому та алюмінію не зрізалися абразивним кругом, то вони або відривалися від покриття, залишаючи на його поверхні виразки, або руйнувалися від контакту з ним з утворенням гострих виступів із їх залишків.

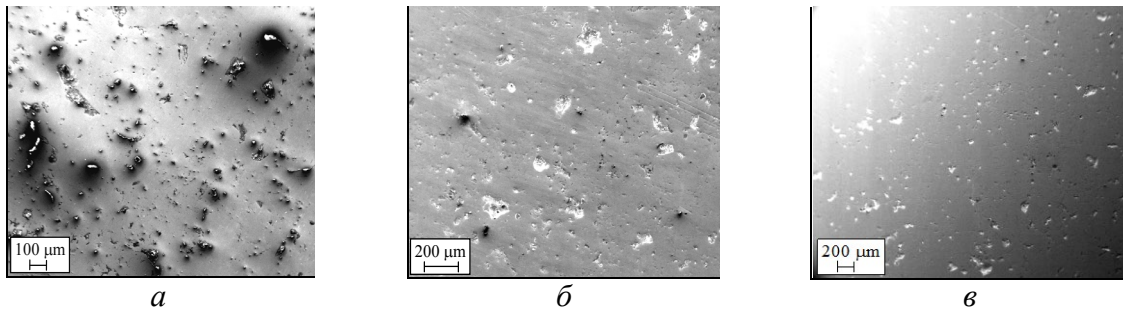


Рис. 5. Топографія поверхні шліфованої поверхні покриттів із ПД Х6Р3Ю6 (а), ПД Х6Р3ГС (б) та ПД Х6Р3ГСТ (в), які відрізнялись за вмістом легуючих елементів

За додавання до шихти ПД феромарганцю у структурі покриття утворювалися оксиди марганцю з невисокою мікротвердістю, які не формували ріжучих крайок за фрикційної взаємодії у парах тертя (рис. 5 б). Під час напилювання ЕДП з використанням ПД, до складу шихти якого входив титан з його здатністю швидко реагувати з киснем повітряного струменю, у покритті формувалися включення оксиду титану з мікротвердістю 7 ГПа. Однак, на відміну від оксидів інших елементів, включення на основі оксиду титану та марганцю були значно дисперсними і не ставали ріжучими крайками під час фрикційної взаємодії покриття із контртілом (рис. 5в). Суттєве зниження шорсткості поверхні таких покриттів робить їх привабливими для застосування у парі з ширококовжливаними контртілами.

**Висновки.** На шліфованій поверхні покриттів із ПД, що містили Al та Cr, залишалися мікростави з їх оксидів, які не усувалися під час шліфування абразивним (корундовим) кругом та слугували ріжучими крайками за фрикційної взаємодії у парах тертя. За додавання до шихти ПД феромарганцю або феротитану в структурі ЕДП формувалися дрібнодисперсні оксиди на основі Mn та Ti з дещо нижчою мікротвердістю, які легко шліфувалися абразивним кругом, забезпечуючи низьку шорсткість поверхні і підвищену їх роботоздатність в парі з традиційними контртілами.

**Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проекту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.**

#### Перелік посилань

1. A review on the wear, corrosion and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings / J. N. Ndumia, M. Kang, B.V. Gbenontin, J. Lin, S.M. Nyambura // *Nanomaterials* 2021, 11, 2527. <https://doi.org/10.3390/nano111025272>.
2. 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 / T.R. Stupnyts'kyi, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet's'kyi // *Materials Science*, 2016, 52(2), 165–172. DOI:10.1007/s11003-016-9939-8
3. Assessment of abrasive wear of nanostructured WC–Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray / C. Lima, R. Libardi, R. Camargo, H. Fals, V. Ferraresi // *J. Therm Spray Techn.*, 2014, 23, Article number: 10971104. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>.
4. Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions / M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnytskyi, O. Student, P. Maruschak, O. Prentkovskis, P. Skačkauskas // *Coatings*, 2022, 12(7), 925. DOI:10.3390/coatings12070925