

УДК 621.793.

М.Студент, канд. техн. наук

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

ОСОБЛИВОСТІ ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИВІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ПІСЛЯ ШЛІФУВАННЯ ТА ПОЛІРУВАННЯ

Показано, що після шліфування на поверхні електродугових покривів формуються виступи, які за хімічним складом можуть бути трьох типів: оксиди алюмінію, оксиди заліза леговані алюмінієм та карбіди заліза леговані хромом (або іншими елементами легування), вкриті оксидною плівкою, які можуть бути на поверхні окремо або всі разом. Розкрито природу виникнення таких виступів та запропоновано, як можна їх уникнути. Зокрема, виступи на поверхні шліфованого покриву, зумовлені неповним розчиненням карбідів у розплаві сталевій оболонки, ефективно усуваються, збільшивши дисперсність порошку карбідів, що додають до шихти ПД. Виступи, сформовані оксидами, ефективно усуваються підвищенням напруги горіння дуги, додаванням до шихти ПД порошоків титану та магнію. Щоб не було тріщин у покриві, береги яких виконують роль різців, формують мартенситну матрицю покриву та попередньо підігрівають деталі, аби забезпечити мінімальний рівень напружень розтягу у покриві.

Ключові слова: електродугові покриви з порошкових дротів, зношування через граничне тертя, фазовий склад покривів, мікроспектральний аналіз покривів, шорсткість поверхні.

M. Student

THE TOPOGRAPHY FEATURES OF THE GRINDING FINISH AND POLISHED SURFACES ARC-SPRAYED COATING FROM THE CORED WIRES

It was shown that after grinding finish on the surfaces of the arc-sprayed coating the prominences are formed. Three types of prominences with different chemical composition can exist: oxides of aluminum, oxides of iron alloyed by aluminum and iron carbides alloyed by chromium (or other alloying elements). All these inclusions are covered by oxide film and can be located separately or together on the surface. The origin nature of such prominences was revealed and ways to avoid this origin was proposed. Particularly the prominences on the grinding finish surface of coating caused by the incomplete dissolution of carbides into melted steel shell of the cored wires are efficiently removed by increasing the carbides powder dispersity added to the fusion mixture of the cored wires. The prominences formed by oxides are efficiently removed by increasing the burning arc voltage or by addition of Ti and Mg to the fusion mixture of the cored wires. The cracks edges in the coating fulfil the role of cutting picks. The effect of these cracks can be eliminated by the forming of the martensite matrix in coating and using of preliminary heating of the detail in order to ensure the minimum level of the tensile stresses in the coating.

Key words: arc-sprayed coating from the cored wires, boundary frictional wear, phase composition of coatings, microspectrum analysis of coatings, surface roughness.

Електродугові покриви з порошкових дротів (ПД) широко використовують у промисловості для відновлення деталей машин, які працюють за умов граничного тертя [1-5]. Це колінчасті вали різного призначення, розподільчі вали, вали масляних насосів тощо. Через високі питомі навантаження (понад 10-14 МПа) у парі тертя (електродуговий покрив – бронза) катастрофічно зношується бронзове контртіло. При цьому в мастилi з'являються продукти зношування – дрібна (субмікронна за розмірами) стружка бронзи. Зауважимо, що інтенсивне зношування контртіла може проявитися як одразу (після кількох годин експлуатації), так і після тривалого часу роботи. Як свідчить практика експлуатації відновлених електродуговим напиленням деталей машин тип мастила значно впливає на час до моменту появи такого зношування. Як

правило, із застосуванням синтетичних мастил рівень питомих навантажень, за яких проявляється катастрофічне зношування контртіла, суттєво зростає. Про причини, які інтенсифікують зношування контртіла в парі тертя з напиленим газотермічним, а тим більше електродуговим покривом, у літературі не повідомляють. Оскільки причини цього негативного явища дотепер не відомі, то не можна виробити рекомендації, спрямовані на усунення цих негативних проявів.

Мета роботи – розкрити причини катастрофічного зношування контртіла в парі з покривом із ПД, напиленим електродуговим методом, за умов граничного тертя.

Методичні аспекти досліджень

Електродугові покриття наносили електрометалізатором ГТ-1 [6], розпилюючи ПД діаметром 1,8 мм. За шихтові матеріали використали порошки ферохрому ФХ-800, ферохромбору ФХБ-2, феротитану ФТИ-40А ГОСТ 4761-80, заліза ПШО, алюмінію ПА-40 та алюміній-магнію ПАМ-40. За оболонку для дроту використали стрічку шириною 12 мм і товщиною 0,4 мм із сталі 08кп. Коефіцієнт заповнення дроту становив 22...25%. Режими нанесення покриттів: напруга 32 і 40 В за струму дуги 150 А. Газ для розпилення – повітряний струмінь під тиском 0,6 МПа. Віддаль, з якої напилювали, – 150 мм.

Шорсткість поверхні напиленого покриття оцінювали, використовуючи профілометр 170621 з автоматизованим записом результатів замірів. Трибологічні властивості визначали на установці СМЦ-2, в якій використали схему диск-колодки за умов граничного тертя. Питоме навантаження становило 2...28 МПа, а швидкість ковзання – 0,67 м/с. У випробах використали дизельне (М-10Г2К) та синтетичне (Castrol 10W40) мастила. Матеріалом колодки була бронза БрС-30. Покриття товщиною 1,5 мм наносили на зразки – диски зі сталі 45 (*HRC* 28...30) діаметром 40 мм і товщиною 10 мм. Їх шліфували (з боку покриття) до робочої товщини покриття 1 мм.

Фазовий склад покриттів у вихідному стані вивчали на дифрактометрі ДРОН-3 із комп'ютерним записом дифрактограм, використавши $\text{CuK}\alpha$ випромінювання, $U = 32$ кВ, $I = 15$ мА та крок сканування $0,05^\circ$.

Структуру, хімічний склад покриттів та аналіз поверхонь тертя зразків після випроб досліджували під електронним мікроскопом EVO-40 XVP (Carl Zeiss) із системою для мікроаналізу EVO-4XVP. Об'єм пор у шихті ПД визначали методом січних.

Результати досліджень та їхнє обговорення

Електродугові покриття, що працюють у парі з контртілом за умов граничного тертя, механічно обробляють, шліфуючи деталі до необхідного розміру. Шорсткість шліфованої поверхні напиленого покриття із ПД суттєво більша за шорсткість шліфованої поверхні гартованої сталі (рис. 1а, б). Це пов'язано з тим, що нанесений покрив за своєю природою є композитом. Структура покриття формується із розплавлених краплин металу, утворених унаслідок сплавлення сталеві оболонки та шихти ПД. У момент їхнього контактування з поверхнею напилення вони деформуються, набувають форми сплюснутих краплин, що нагадують блюдечка, швидко кристалізуються на ній, формуючи ламелярну структуру. Кожна ламель оточена тонкою оксидною плівкою, тому міцність напиленого покриття є невисокою (не перевищує 300 МПа) порівняно із суцільним металом подібного хімічного складу, але отриманим унаслідок кристалізації із розплаву. Крім того, у структурі покриття є великі (діаметром до 100 мкм) оксидні включення та карбіди, які слабо пов'язані із суміжними ламелями. Після шліфування та полірування зразків із неоднорідним за складом покривом (практично композит на рівні структурних складових покриття) поверхня гладка, з виступами (рис. 2). За умов граничного тертя, коли питоме навантаження перевищує 10...14 МПа і товщина граничної плівки мастила стає меншою за висоту виступів, останні починають виконувати роль різців, що постійно знімають із контртіла мікростружку, спричиняючи його катастрофічне руйнування.

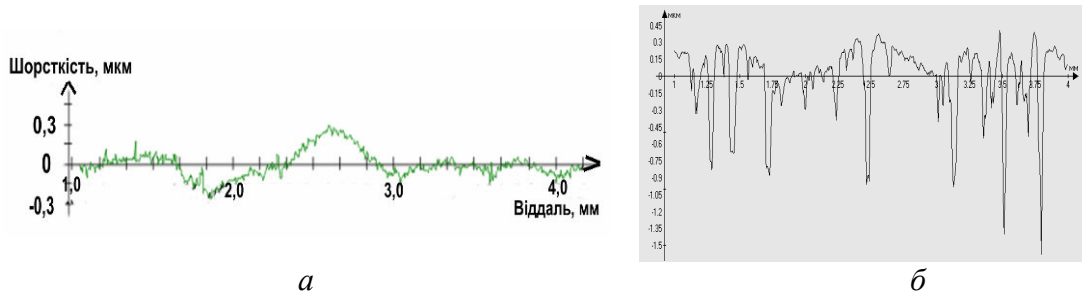


Рисунок 1 – Шорсткість поверхні зразків зі сталі 45 (HRC 50...52) без (а) та з покритвом із ПД на основі ферохрому (б) після шліфування та полірування

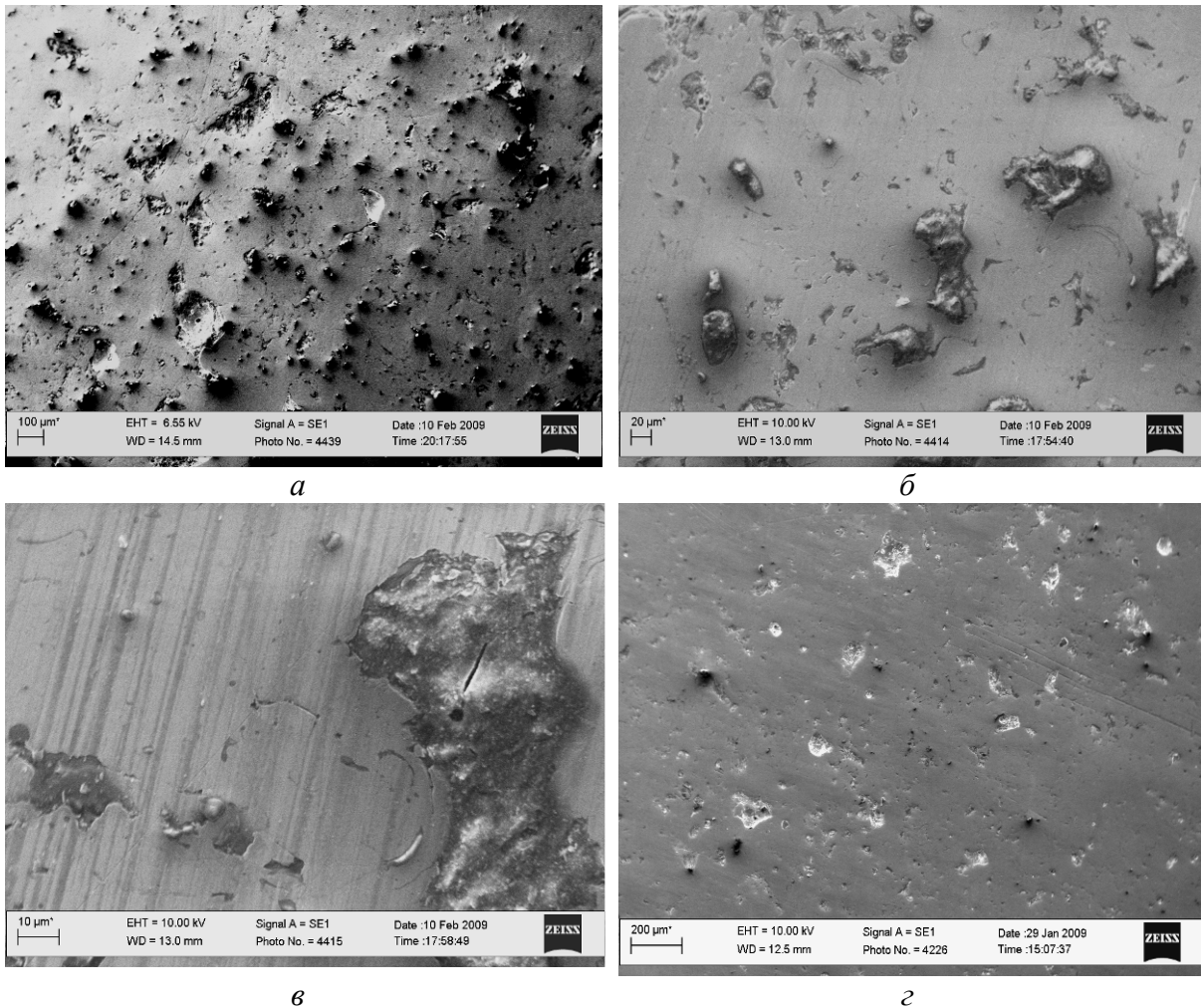


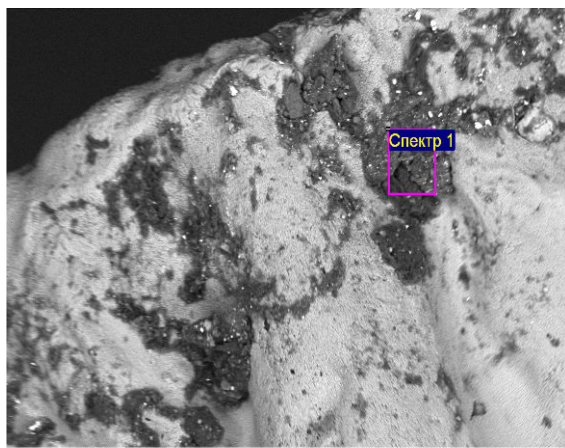
Рисунок 2 – Мікровиступи, утворені карбідами, на полірованій поверхні зразків із покритвами з ПД на основі ферохрому ФХ-800 із розміром порошку 300 мкм (а-б) та ФХ-800 із розміром порошку 50 мкм (з)

Мікроспектральний аналіз досліджених типів покриттів довів, що за хімічним складом мікровиступи на поверхні покритву можуть бути трьох типів: утворені оксидами алюмінію, заліза, легованими алюмінієм та карбідами заліза, легованими хромом та іншими елементами легування. Вони вкриті оксидною плівкою і можуть виходити на поверхню як окремо, так і всі разом. Додавання до шихти ПД сильних карбідотвірних компонентів, таких як Мо, W, V, сприяє збільшенню кількості та висоти мікровиступів. Як правило, виступи утворюють карбіди, що входили до складу шихти ПД, які під час плавлення не повністю розчинились у розплаві сталеві оболонки. Порошки із карбідів зазвичай мають високу температуру плавлення, вкриті оксидною плівкою та слабо змочуються розплавом алюмінію, який входить до складу шихти ПД (алюміній необхідний для протікання алюмотермічних реакцій, які забезпечують високу адгезію між покритвом і поверхнею деталі).

Бориди заліза та хрому ліпше змочуються розплавленим алюмінієм та розплавом сталеві оболонки [7] та утворюють легкоплавкі евтектики із залізом. Тому бориди, що входять до складу шихти ПД, як правило, швидко та повністю розчиняються і практично не утворюють мікровиступів на металевій поверхні внаслідок кристалізації. Використання порошку карбідів вищої дисперсності ефективно усуває мікровиступи, зумовлені неповним розчиненням карбідів. Порошок ферохрому з частками менших розмірів швидше розчиняється у розплаві оболонки, утворюючи гомогенний розплав. Тобто зі зменшенням діаметру порошку ферохрому від 300 до 50 мкм кількість мікровиступів зменшується у десятки разів (рис. 2 а, з).

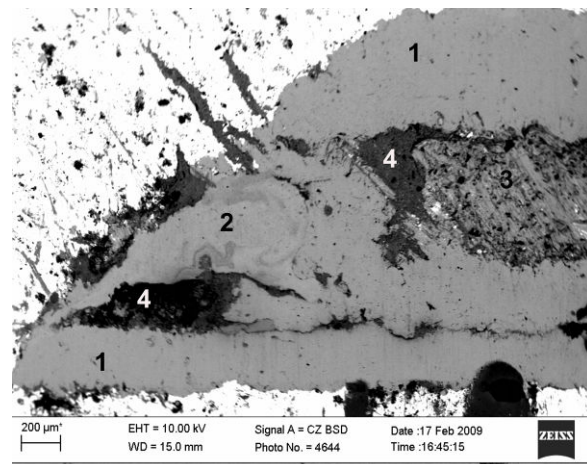
Утворення у покриві великих за розмірами оксидів відбувається так: після плавлення ПД у дузі від торців дротів відриваються (під дією аеродинамічних сил повітряного потоку) краплини розплавленого металу, які повітряним потоком подрібнюються та транспортуються до поверхні напилення. Температура розплаву на торці ПД сягає понад 2200 °С. За таких умов інтенсивне кипіння розплаву сповільнює або навіть блокує утворення оксидів на його поверхні. Під час виготовлення ПД його протягують через мильну пудру, а тоді (перед нанесенням покривів) прогрівають за температури 220...240 °С. Мильна плівка на зовнішній поверхні ПД перетворюється на плівку вуглецю, забруднену різними домішками. Під час плавлення ПД цей вуглець потрапляє у зону розплаву (рис. 3), реагує з киснем (згідно з реакцією $C + O_2 = CO_2$) і таким чином захищає зовнішню поверхню ПД та розплав від окислення.

На поздовжньому шліфі ПД виявили, що внутрішня поверхня сталеві оболонки ПД поблизу зони розплаву, де температура сягає понад 1500 °С, взаємодіє з киснем, який завжди є у порожнинах шихти ПД, з утворенням великих (завбільшки 200...300 мкм у поперечнику) оксидів (рис. 4). Алюміній, що входить до складу шихти ПД, у зоні 2 плавиться і відновлює оксиди заліза (згідно з реакцією $2/m Me_nO_m + 4/3 Al = 2 n/m Me + 2/3 Al_2O_3$). При цьому утворюється розплав оксиду алюмінію, під час диспергування якого формуються окремі краплини (рис. 5). Саме вони формують ламелі з оксидів у структурі покриву.



Елемент	Вагові %
C	59,9
O	21,5
Na	0,8
Al	0,7
Si	1,4
S	0,7
Cl	2,0
K	2,0
Ca	2,7
Co	2,3
Pb	6,0
Разом	100,0

Рисунок 3 – Край торця ПД та спектр частки графіту, утвореної з мильної плівки



Елемент	Вагові %	
O	11,2	1 – сталеві оболонка ПД;
Al	0,7	2 – зона розплаву;
Si	0,5	3 – шихта ПД;
Cr	2,2	4 – ділянка утворення
Fe	85,4	оксидів заліза (спектр)
Разом	100,0	

Рисунок 4 – Поздовжній переріз кінця ПД після припинення розплення

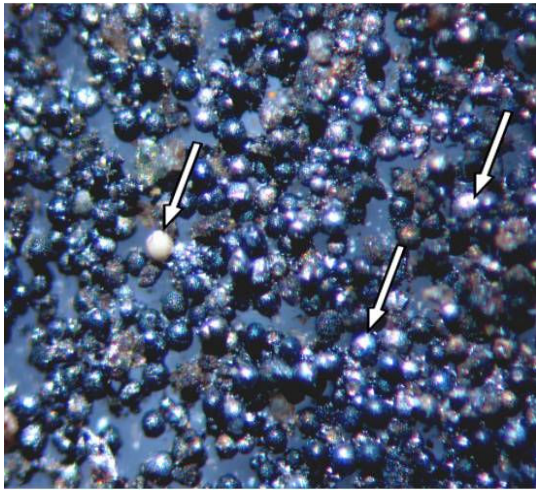
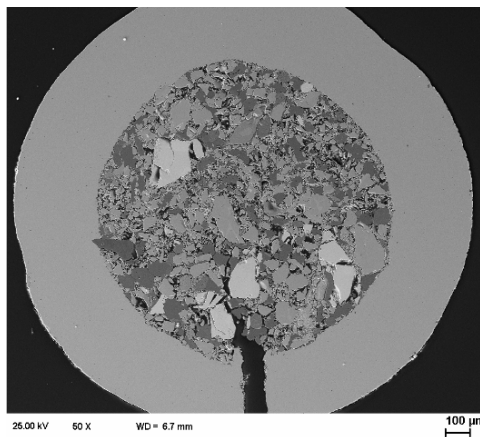


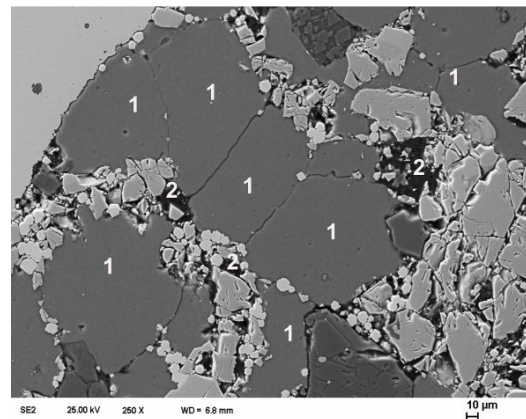
Рисунок 5 – Краплини розплаву ПД, вловлені у снігову мішень. Стрілками вказано застиглі краплини оксиду алюмінію

Під час виготовлення ПД протягується через ряд філер. Діаметр дроту – зменшується від 4,0 до 1,8 мм, а його шихта ущільнюється. Чим більше м'яких та пластичних складових входить до складу шихти ПД, тим більша можливість для ущільнення. Зокрема, зі збільшенням у шихті ПД вмісту м'якого та пластичного порошку алюмінію, об'єм, що припадає на порожнини, зменшується. Так, для шихти ПД, що містить 15 ваг. % порошку алюмінію, порожнини займають 10 % об'єму (рис. 6 а, б). Коли вміст порошку алюмінію збільшується до 60 ваг. %, то об'єм порожнин у шихті зменшується до 2 % (рис. 6 в, г). Відповідно зменшується уміст в шихті повітря, а отже – і кисню.

Вміст оксидів, а отже і мікровиступів, зменшується також зі збільшенням напруги горіння дуги під час наплення покриву (рис. 7з). Адже збільшення напруги призводить до зростання температури розплаву в дузі, що сприяє повнішому розчиненню тугоплавких складових шихти ПД. Ефективно усувають великі оксиди у покриві такі компоненти шихти ПД, яким термодинамічно вигідніше взаємодіяти з киснем повітря (зокрема, такі, як титан, магній та графіт, ізобарно-ізотермічний потенціал реакцій окислення яких суттєво від'ємніший порівняно із залізом (рис. 8).



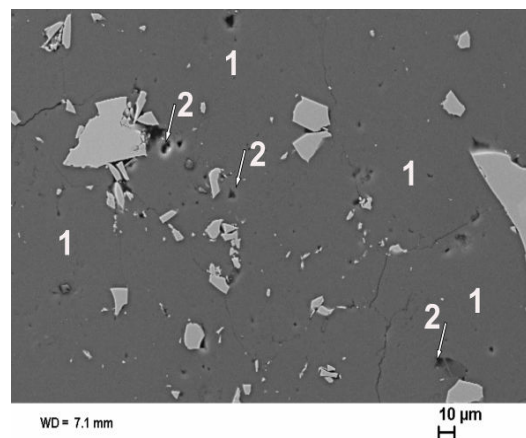
а



б



в



г

Рисунок 6 – Структура ПД на основі Fe-Cr-B-Al у поперечному перерізі за вмісту алюмінію 15 (а, б) та 60 (в, г) ваг. %. На фоні алюмінієвої матриці (1) видно порожнини в шихті ПД (2)

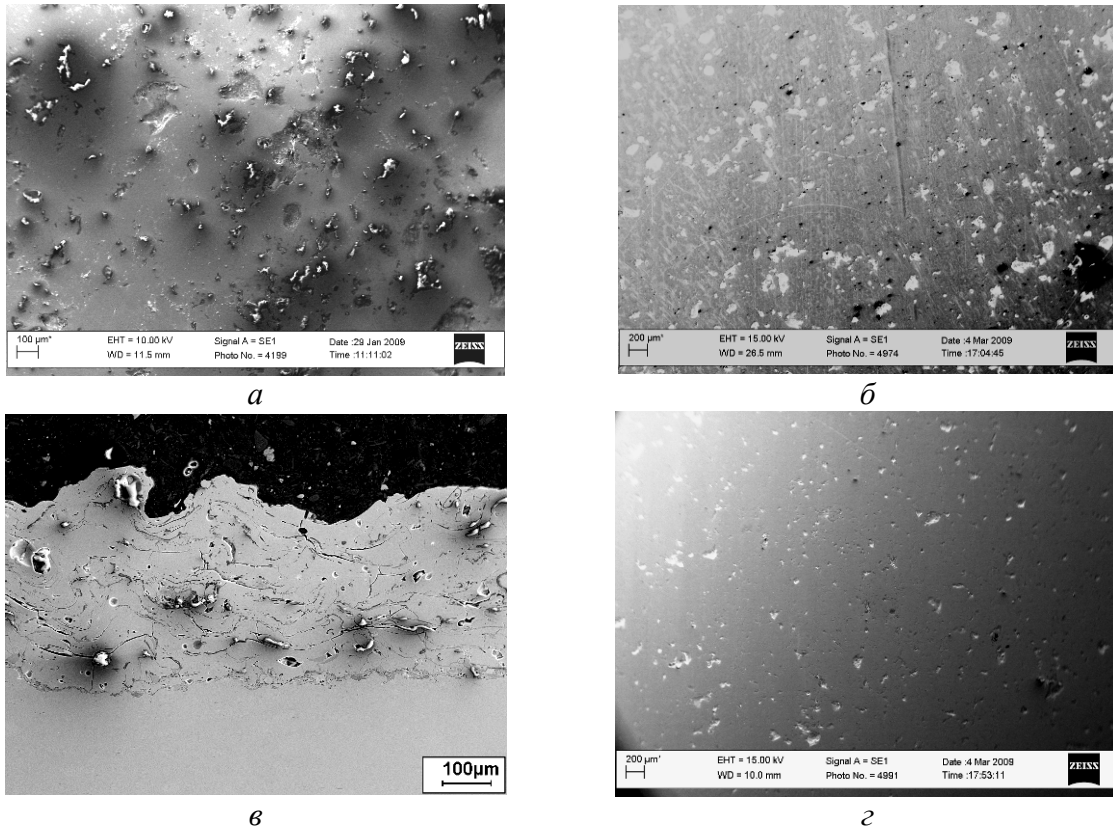


Рисунок 7 – Мікровиступи, утворені оксидами, на полірованій поверхні (а, б, г) та поперечному перерізі (в) покриття з ПД на основі ферохромбору ФХБ-2 за вмісту алюмінію у шихті 15 (а) і 60 (б-г) ваг. % та за напруги горіння дуги 32 (а-в) і 40 (г) В

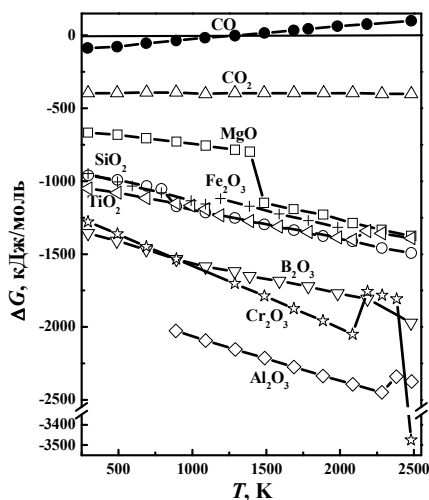


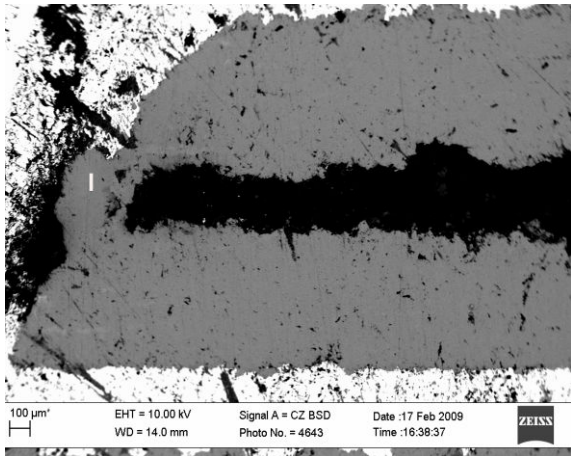
Рисунок 8 – Ізобарно-ізотермічний потенціал ΔG реакцій окислення складових шихти ПД [8]:
 $2C + O_2 = 2CO$; $C + O_2 = CO_2$;
 $Mg + 1/2O_2 = MgO$; $4/3Fe + O_2 = 2/3Fe_2O_3$; $Si + O_2 = SiO_2$; $Ti + O_2 = TiO_2$; $4/3B + O_2 = 2/3B_2O_3$; $4/3Cr + O_2 = 2/3Cr_2O_3$; $4/3Al + O_2 = 2/3Al_2O_3$

карбідів та нітридів. За таких умов шорсткість поверхні шліфованого та полірованого покриття суттєво поліпшується (рис. 12).

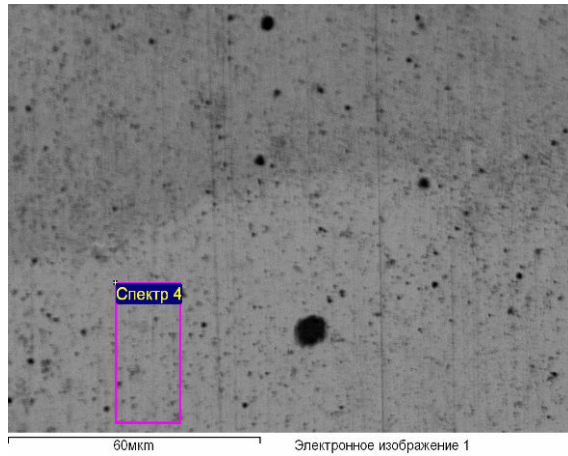
Як відомо [9], після нанесення електродугових покриттів із ПД у них виникають значні напруження розтягу. Під час шліфування у покриттях виникають мікротріщини (рис. 13а), береги яких зміщуються (під дією радіальних залишкових напружень) та виконують роль різців (рис. 13б). За підвищених питомих навантажень в умовах

Під час плавлення ПД у зоні 2 та 3 (див. рис. 4.) магній та титан, які мають високу пружність парів, випаровуються та утворюють оксиди, забираючи кисень із зони плавлення. Оскільки оксиди магнію та титану утворюються із парової фази, то у ділянці плавлення ПД вони дуже дрібні (1...2 мкм завбільшки, рис. 9б, в). У структурі ж покриття ці оксиди стають дещо більшими, але за величиною не перевищують 8 мкм (рис. 10). Коли кисень у зоні плавлення ПД зв'язаний (в оксидах), то азот (з повітря), який залишається, взаємодіє з титаном, хромом та алюмінієм, утворюючи карбонітриди та оксинітриди (рис. 9в). Термодинамічний аналіз підтверджує, що азот із повітря може взаємодіяти з титаном, хромом, алюмінієм або магнієм, утворюючи нітриди лише у тому випадку, коли кисень із повітря зв'язати в оксидах, утворення яких термодинамічно більш вигідний процес (рис. 11). Таким чином, за наявності у шихті ПД магнію або титану великі оксиди алюмінію або легованого оксиду заліза перетворюються у дрібні включення оксидів,

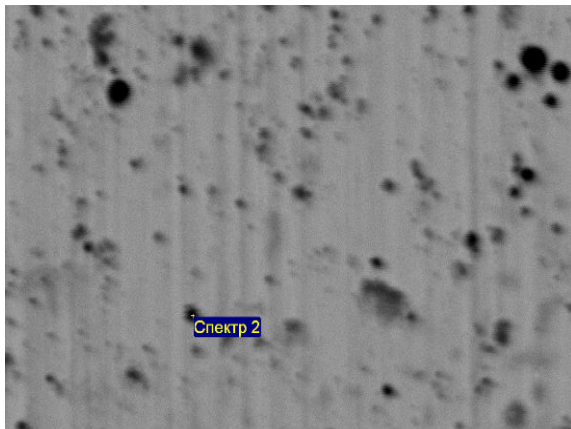
граничного тертя такі різці знімають мікростружку з контртіла (рис. 13в), що призводить до катастрофічного зношування контртіла (бронзи), збільшення зазора понад допустиму норму і, як наслідок, виведення агрегата із ладу. Завдяки нашим дослідженням встановлено, що найвищі залишкові напруження розтягу (150 МПа) виникають у покривах, матричною фазою у яких є аустеніт.



а



б



в

Спектри світліших (табл. зліва) та темніших (справа) виділень у структурі зони розплаву ПД (в)

Елемент	Ваг. %	Елемент	Ваг. %
С	5,1	N	5,2
N	5,4	O	5,4
Ti	29,4	Al	3,8
Cr	19,5	Ti	26,1
Mn	0,0	Cr	14,6
Fe	40,6	Mn	5,0
Разом	100,0	Fe	39,9
		Разом	100,0

Рисунок 9 – Структура ПД з 5% титану в шихті (поперечний переріз ПД) у зоні плавлення I (а) та за різної роздільної здатності (б, в)

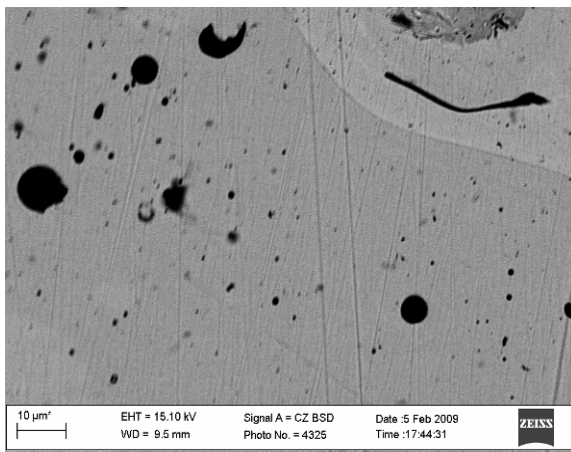


Рисунок 10 – Типова структура покриву з ПД, що містить у шихті 5% титану з оксидами, карбідами та нітридами

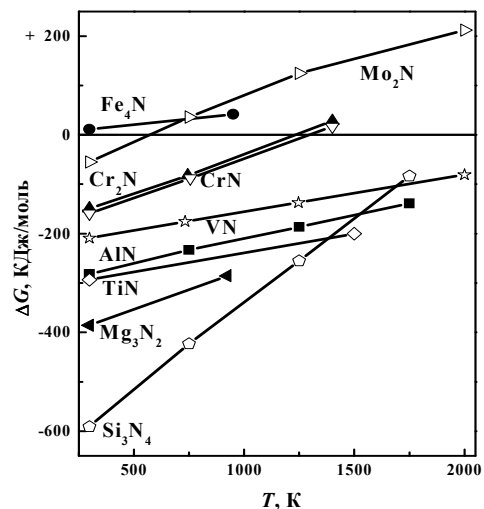


Рисунок 11 – Ізобарно-ізохоричний потенціал ΔG реакцій утворення нітридів, для протікання яких під час плавлення ПД є передумови [10]

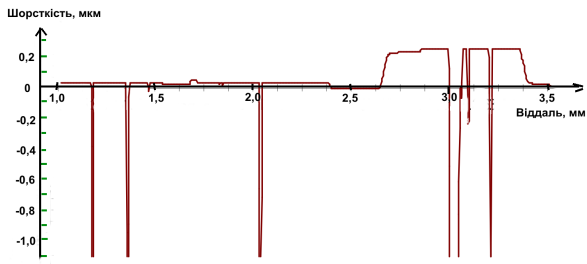
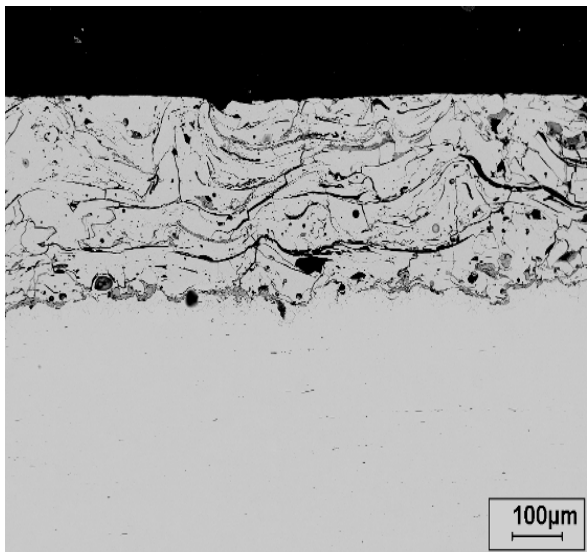


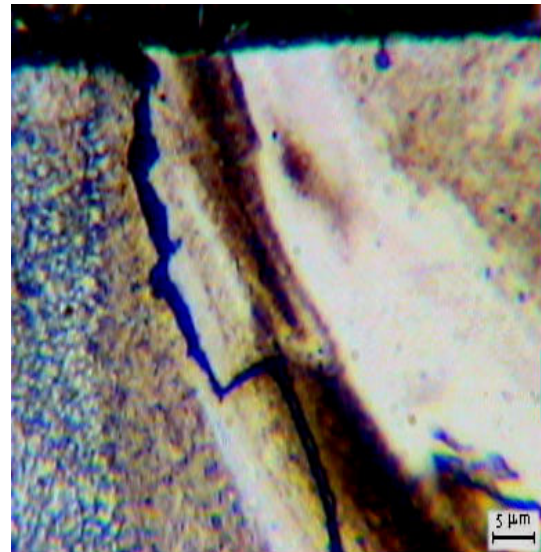
Рисунок 12 – Шорсткість покриття з ПД на основі ферохрому, до шихти якого додатково додали 5 ваг.% титану

є ферит із включенням 30 % (за об'ємом) дисперсних (200 нм завбільшки) боридів FeCr_2B , напруження розтягу зростають від 70 до 100 МПа.

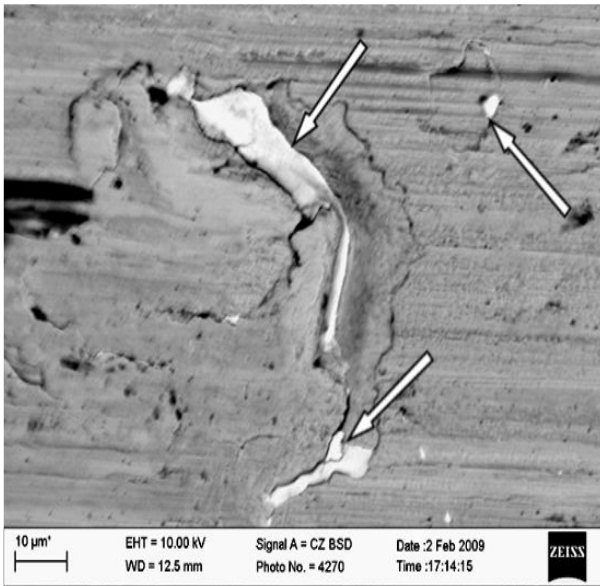
Якщо ж у покритті матричною фазою є ферит, то напруження розтягу знижуються до 70 МПа. Найнижчі ж напруження розтягу виникають у покриттях, матричною фазою у яких є мартенсит (40 МПа). Наявність у матричній фазі дисперсних виділень карбідів, боридів або інтерметалідів зумовлює зростання напружень розтягу. Зокрема, у покритті з ПД, який містив 2 ваг. % бору і матричною фазою в якому



а



б



в

Рисунок 13 – Виникнення тріщин у покритті з ПД після шліфування. Стрілки вказують на частинки бронзи БРС-30 на покритті із ПД, зрізані берегами тріщини після випроб паритертя «покриття-БРС-30» – за умов граничного тертя у мастилі М-10Г2К та питомого навантаження 14 МПа

Підігрівання деталі перед напиленням суттєво знижує напруження розтягу в покриттях. Зокрема, нагрівання деталі до 200°C зменшує напруження розтягу в покритті з феритною матрицею, що містить 30 % боридів FeCr_2B , від 100 до 30 МПа. Імовірність виникнення тріщин у покритті після шліфування деталей при цьому суттєво зменшується і, як наслідок, катастрофічне зношування контртіла за умов граничного тертя відбувається за істотно вищих питомих навантажень.

Висновки:

1. Після шліфування на поверхні електродугових покривів формуються виступи, які за хімічним складом можуть бути трьох типів: оксиди алюмінію, оксиди заліза леговані алюмінієм та карбіди заліза леговані хромом (або іншими елементами легування), вкриті оксидною плівкою, які можуть бути на поверхні окремо або всі разом.
2. Виступи на поверхні шліфованого покриву, що виникли через неповне розчинення карбідів у розплаві сталевий оболонки, ефективно усувають, збільшивши дисперсність порошку карбідів, що додають до шихти ПД. Виступи, сформовані оксидами, ефективно усувають, підвищивши напругу горіння дуги, додаючи до шихти ПД порошки титану та магнію.
3. Щоб не було тріщин у покриві, береги яких виступають як різці, формують мартенситну матрицю покриву та попередньо підігрівають деталь, аби забезпечити мінімальний рівень напружень розтягу в покриві.

Література

1. Електродугові відновні та захисні покриття / [В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгуник та ін.]. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2005. – 192 с.
2. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCr+Al+C для электродуговой металлизации / В.И. Похмурский, М.М. Студент, И.Й. Сидорак [та ін.] // Автоматическая сварка. – 2002. – №3. – С. 32–35.
3. Wear resistance arc-sprayed coatings from powder wires: Proc. Int. Thermal Spray Conf, ITSC-2002 / [V. Pokhmurskii, M. Student, I. Sydorak, et al]; Ed. E. Lugscheider. – Essen: DVS/IW/ASM-TSS, 2002. – P. 559–562.
4. Pokhmursky V.I. Nickel free powder wires for electric arc spraying of restoring and wear-proof coating: Proc. 8th Thermal Spray Conf., NTSC '95 / V.I. Pokhmursky, M.M. Student. – Houston: ASM Int'l., 1995. – P. 695–697.
5. Пат. України №19967, МПК (2006) C23C 4/00. Спосіб одержання композиційних електродугових покриттів / С.І. Маркович, В.І. Похмурський, О.Й. Мажейко, М.М. Студент // Власник фізико-механічний ін.-т ім. Г.В. Карпенка НАН України; Кіровоградський національний технічний університет. - № U200605358; заявл. 16.05.2006; опубл. 15.01.2007. – Бюл. – 2007. – №1.
6. А. с. 1657230 СССР, МКИ В 05 В 7/22. Распылительная головка к электрометаллизатору / В.И. Похмурский, М.М. Студент, В.С. Пих, М.А. Тыхан (СССР) // № 4663677–05; заявл. 12.12.88; Опубл. 23.06.91. – Бюл. – № 23.
7. Панасюк А.Д. Стойкость неметаллических материалов в расплавах / А.Д. Панасюк, В.С. Фоменко, Г.Г. Глебова. – Київ: Наукова думка, 1986. – 351 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справочник / [ред. Г.В. Самсонов]. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с.
9. Похмурский В.И. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время формирования / В.И. Похмурский, М.М. Студент, И.А. Рябцев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2006. – №10. – С. 15–20.
10. Самсонов Г.Н., Винницкий Н.М. Тугоплавкие соединения: справочник / Г.Н. Самсонов, Н.М. Винницкий. – М.: Металлургия, 1976. – 558 с.

Одержано 15.08.2009 р.