УДК 621.793

**М. М. Студент*, В. М. Гвоздецький*, Т. Р. Ступницький*,
А. Р. Дзюбик**, Ю. П. Олещук****
* Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
**Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій

СТРУКТУРА ПОВЕРХОНЬ ТА ШОРСТКІСТЬ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ПІСЛЯ ШЛІФУВАННЯ

Розглянуто особливості формування покриття газотермічним методом під час застосування порошкових дротів. Це зумовлено наявністю пор та твердих включень в отриманому шарі. Тому важливо дослідити вплив параметрів механічної обробки та складу порошкового дроту на шорсткість шліфованої поверхні електродугових покриттів. Покриття завтовшки 1,2–1,5 мм наносили серійним електродуговим металізатором ЭМ-14 на заздалегідь оброблену поверхню як плоских, так і циліндричних зразків. Мікроструктуру та хімічний склад покриттів вивчали на електронному мікроскопі Carl Zeiss EVO XVP 40 з рентгеноспектральним мікроаналізатором INCA Energy 350 (Oxford Instruments). Показано, що поверхня електродугового покриття має типову композитну структуру на відміну від сталі, у якій зустрічаються ламелі з різною мікротвердістю. Об'ємна кількість оксидів у покриттях коливається в межах від 6 до 20 %, залежно від кількості та хімічного складу легувальних елементів. Аналіз одержаних результатів показує, що максимальний вміст оксидів у покритті спостерігається під час додавання у шихту ферофосфору, ферохрому та феротитану. Шорсткість напиленого нешліфованого покриття зменшується з підвищенням тиску розпилу повітряного струменя під час напилення покриття на сталеву основу від Rz 85, за тиску 0,4 до Rz 55–0,65 МПа. Встановлено, що із ростом тиску повітряного струменя розмір структурних складових поверхні покриття зменшується, при цьому його зносостійкість за умов граничного мащення зростає.
Ключові слова: електродугове покриття, шорсткість, порошковий дріт, зварювання.

The peculiarities of coating formation by the gas-thermal method at application of powder wires are considered. This is due to the presence of pores and solid inclusions in the resulting layer. Therefore, it is important to investigate the influence of the mechanical processing parameters and the composition of the powder wire on the roughness of the polished surface of the electric arc coatings. Coatings in the thickness of 1.2–1.5 mm were applied with a serial electro-arc metalizer EM-14 on a pre-treated surface of both flat and cylindrical specimens. The microstructure and chemical composition of the coatings were studied on an electron microscope of Carl Zeiss EVO XVP 40 with an INCA Energy 350 (Oxford Instruments) X-ray Spectral Microanalysis. It is shown that the surface of the electric arc coating has a typical composite structure, in contrast to the steel, in which there are lamellae with different microhardness. The volumetric amount of oxides in coatings varies from 6 to 20 %. depending on the amount and chemical composition of the doping elements. Analysis of the results shows that the maximum content of oxides in the coating is observed when added to the charge of ferrophosphorus, ferrochrome and ferrotitanium. The roughness of the sprayed non-polished coating decreases with increasing the pressure of the air jet cutting when spraying the coating on the steel base from Rz 85, at a pressure of 0.4 MPa, to Rz 55–0.65 MPa. It was established that with increasing air pressure, the size of the structural components of the surface of the coating decreases, while its wear resistance in the conditions of limiting lubrication increases. ***Key words: electric arc coating, roughness, powder wire, welding.***

Вступ. Серед газотермічних методів отримання покриттів метод електродугового напилення покриттів є технологічно найпростішим і найдешевшим. Використання для електродугового напилення електродних матеріалів у вигляді спеціальних порошкових дротів (ПД) дало змогу розширити сферу застосування методу та одержати відновні та захисні покриття різного функціонального призначення з високими експлуатаційними характеристиками. Проте електродуговим покриттям є характерна висока поруватість, високий рівень залишкових напружень розтягу, низька когезія та адгезія (порівняно із іншими газотермічними покриттями) [1–6]. На відміну від литих матеріалів, шліфована поверхня напилених покриттів має набагато більшу шорсткість. Це зумовлено наявністю пор та твердих включень у напиленому шарі.

Мета роботи – вивчити вплив параметрів механічної обробки та склад порошкового дроту на структуру та шорсткість шліфованої поверхні електродугових покриттів.

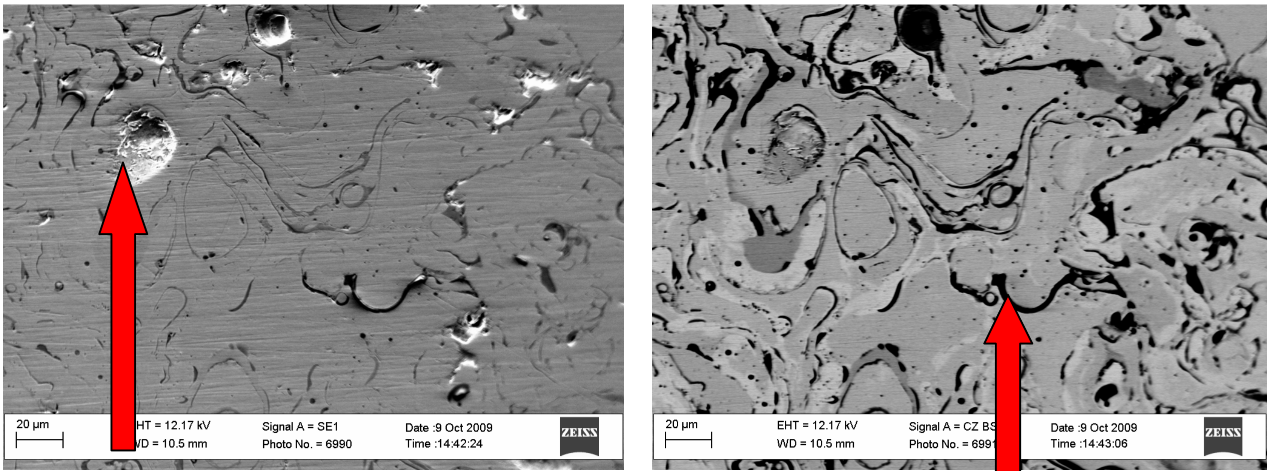
Методика експериментів. Покриття завтовшки 1,2–1,5 мм наносили серійним електродуговим металізатором ЭМ-14 з модернізованою системою розпилення на заздалегідь оброблену дробинноструминним методом поверхню як плоских, так і циліндричних зразків зі сталі марки Ст. 3, розпилюючи ПД діаметром 1,8 мм.

Як шихтові матеріали використовували феросплави та чисті метали. Оболонку ПД 140Х14Н2Т2Ю виготовляли із стрічки зі сталі 08 кп завтовшки 0,4 мм і завширшки 10 мм. Коефіцієнт заповнення ПД шихтою становив 22–30 %. Режими нанесення покриттів: струм 150 А, напруга дуги 32–34 В. Розпилювали ПД струменем стисненого повітря під тиском 0,4–0,8 МПа з дистанції 150 мм.

Мікроструктуру та хімічний склад покриттів вивчали на електронному мікроскопі Carl Zeiss EVO XVP 40 з рентгеноспектральним мікроаналізатором INCA Energy 350 (Oxford Instruments).

Експериментальні результати. ***Структура поверхонь покриттів після шліфування***

Поверхня електродугового покриття має типову композитну структуру (рис. 1) на відміну від сталі (рис. 2), у якій зустрічаються ламелі з різною мікротвердістю: до 4000 МПа – легований ферит; до 7000 МПа – високовуглецевий легований хромом мартенсит та залишковий аустеніт; до 12000 МПа – ламелі, утворені з карбідів заліза, легованих хромом, оксидних фаз (таких як оксид заліза з мікротвердістю 7000 МПа та оксид алюмінію – з мікротвердістю 20000 МПа), які розташовані переважно вздовж меж ламелей (рис. 1).



Пора *Оксидна плівка*

Рис. 1. Структура шліфованої поверхні покриття із ПД 140Х14Н2Т2Ю

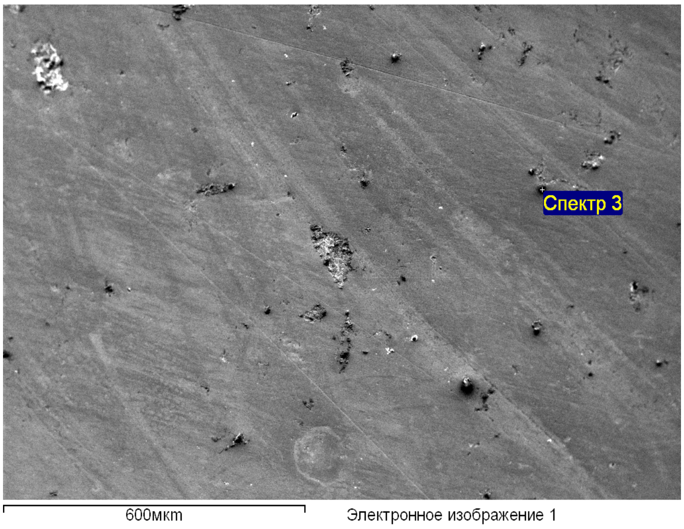
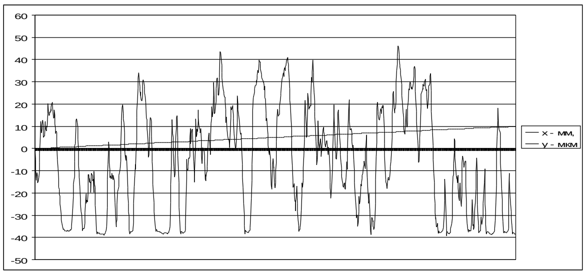
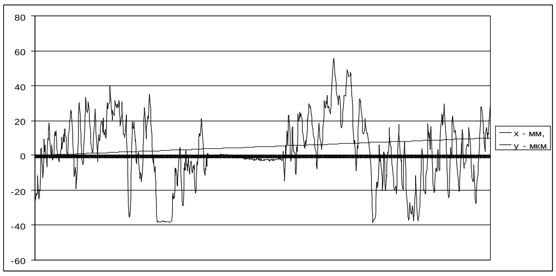


Рис. 2. Структура шліфованої поверхні сталі

Об’ємна кількість оксидів у покриттях коливається у межах від 6 до 20 % залежно від кількості та хімічного складу легувальних елементів Аналіз одержаних результатів показує, що максимальний вміст оксидів у покритті спостерігається під час додавання у шихту ферофосфору, ферохрому та феротитану. Додаток у шихту ПД таких елементів, як Al або Si, істотно зменшує вміст оксидів у покритті, причому змінюється їх хімічний склад. Без додавання у шихту ПД алюмінію або кремнію, оксиди у покритті формуються переважно із хрому, залізовмісних оксидів або їх суміші. За додавання алюмінію та титану у шихту ПД у покритті переважно утворюється суміш оксидів алюмінію та титану за рахунок відновлення інших оксидів, крім титану, до чистих елементів. Під час додавання алюмінію та кремнію у шихту ПД у покритті переважно утворюються оксиди алюмінію за рахунок відновлення усіх інших оксидів до чистих елементів. Це дає змогу збільшити вміст легувальних елементів у структурі покриття, а особливо хрому. Встановлено, що шорсткість напиленого, не шліфованого ЕДП зменшується з підвищенням тиску розпилу повітряного струменя під час напилення покриття на сталеву основу від Rz 85 за тиску 0,4 МПа до Rz 55 – за тиску 0,65 МПа (рис. 3).



P = 0,4МПа



P = 0,65 МПа

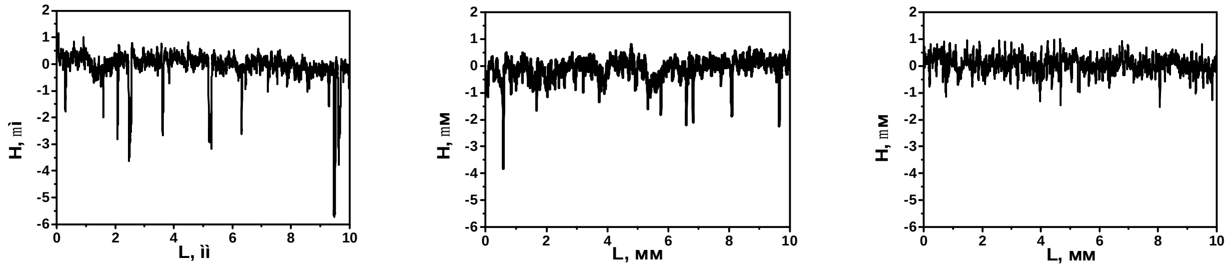
Рис. 3. Профілограми поверхні ЕДП за різного тиску розпилу

Аналогічною є поведінка шліфованих поверхонь ЕДП – із зростанням тиску повітряного струменя шорсткість зменшується (рис. 4). Так, за збільшення тиску розпилу повітряного струменя від 0,4 до 0,8 МПа Rz поверхні ЕДП зменшується більш ніж у два рази – від 1,5 до 0,7 µм (рис. 5). При цьому ширина та глибина пор на поверхні покриття істотно зменшуються.

Це говорить про те, що із збільшенням тиску розпилу повітряного струменя чистота поверхні не змінюється в процесі шліфування, зменшується тільки ширина та глибина пор.

Для покриттів, що працюють в умовах граничного мащення під час тертя, така характеристика є позитивною, оскільки кількість мастила, яке всмоктує покриття із збільшенням тиску розпилу повітряного струменя, істотно не зменшується, однак опорна крива поверхні такого покриття має більшу несучу здатність (рис. 6).

Під час шліфування електродугових покриттів деяка частина крупних карбідів та оксидів, які мають невисоку міцність зчеплення з суміжними ламелями, повністю викришуються, утворюючи порожнини у ньому, карбіди, які міцніше пов’язані із суміжними ламелями, не викришуються або частково викришуються, і після шліфування виступають над поверхнею покриття у вигляді виступів. Після полірування такого покриття у тих місцях, де карбіди або оксиди залишилися, спостерігались чіткі виступи, висота яких над поверхнею покриття становила ~ 0,05…0,1 μм (рис. 6).



P=0,4 МПа Rz=1,5 P=0,6 МПа Rz=1,0 P=0,8 МПа Rz=0,7

Рис. 4. Профілограми шліфованої поверхні ЕДП за різного тиску розпилу

Середнє відхилення профілю Ra покриття фактично не змінюється (рис. 5).

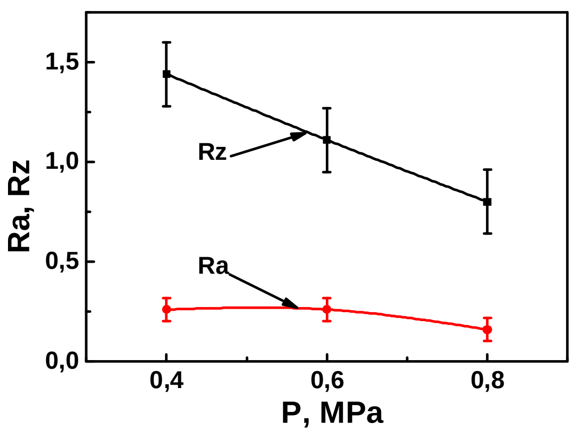


Рис. 5. Залежність параметрів шорсткості ***Ra*** *та* ***Rz*** *від тиску розпилу*

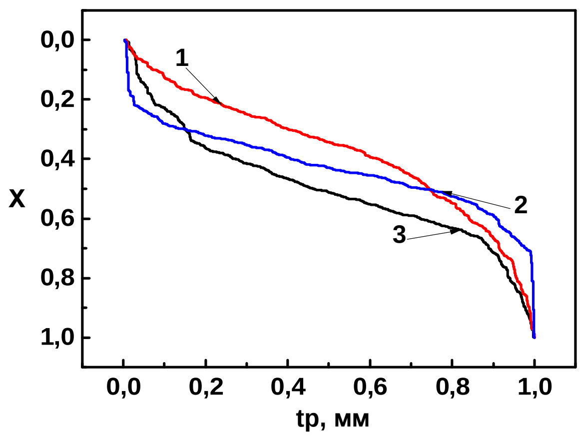


Рис. 6. Опорні криві шліфованого ЕДП: 1 – 0,8 МПа; 2 – 0,6 МПа; 3 – 0,4 МПа

За умов граничного тертя за високих питомих навантажень такі виступи виконують роль ріжучих кромок, що призводить до катастрофічного зношування матеріалу контртіла та виходу із ладу пари тертя. Одночасно впадини та порожнини на поверхні покриття виконують роль резервуарів для мастила, яке потрапляє в зону тертя і збільшує товщину граничної плівки мастила (рис. 7). Таке покриття краще працює за недостатньої кількості мастила.

Полірування шліфованих покриттів згладжує та зменшує висоту виступів над оброблюваною поверхнею покриття, утворених карбідами та оксидами, проте не ліквідує їх та не змінює глибини впадин (рис. 8, *а*). До того ж полірування гартованої сталі за цими самими режимами істотно зменшує і кількість, і висоту виступів над поверхнею (рис. 8, *б*).

Найбільша кількість виступів на шліфованій та полірованій поверхні покриття спостерігається на покритті із ПД140Х14 (рис. 9, *а*). Це зумовлено високою кількістю утворених у процесі напилення оксидів хрому та нерозчинених із шихти крупних карбідів хрому у структурі покриття, які мають високу твердість 3000 та 18000 Мпа, відповідно (зіставною або вищою, ніж абразивні круги із корунду, твердістю 20000 МПа, якими шліфують покриття).

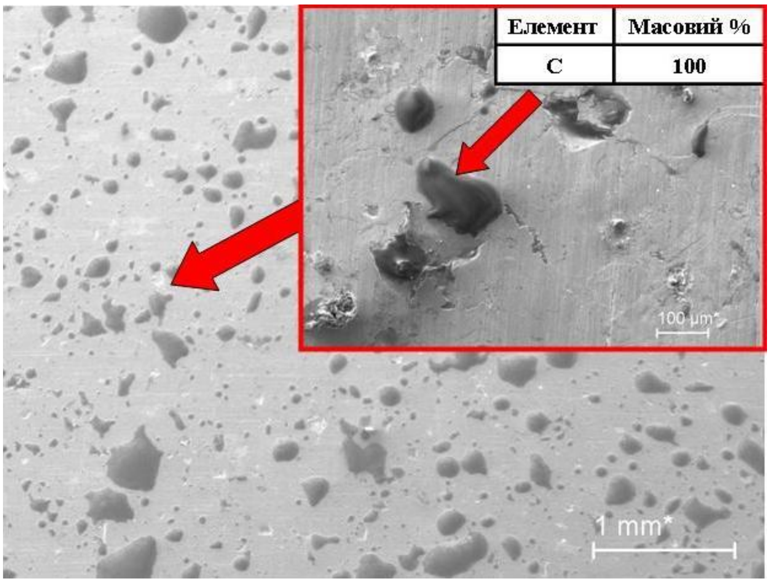
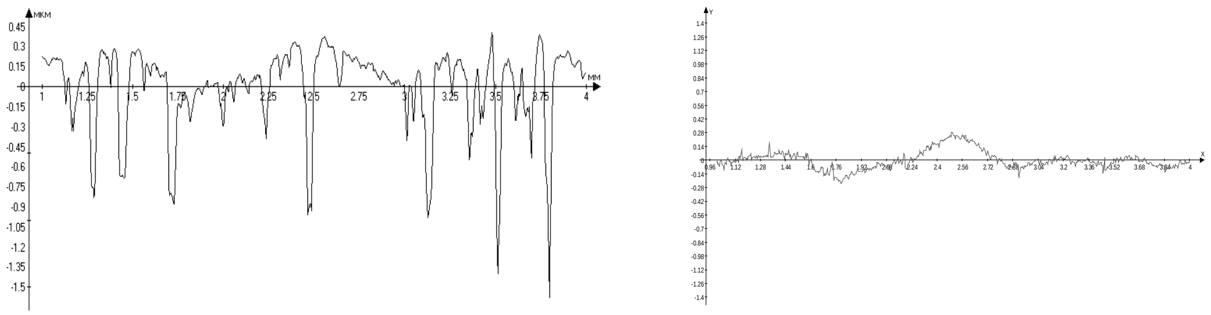


Рис. 7. Порожнини на поверхні ЕДП, у яких накопичується мастило

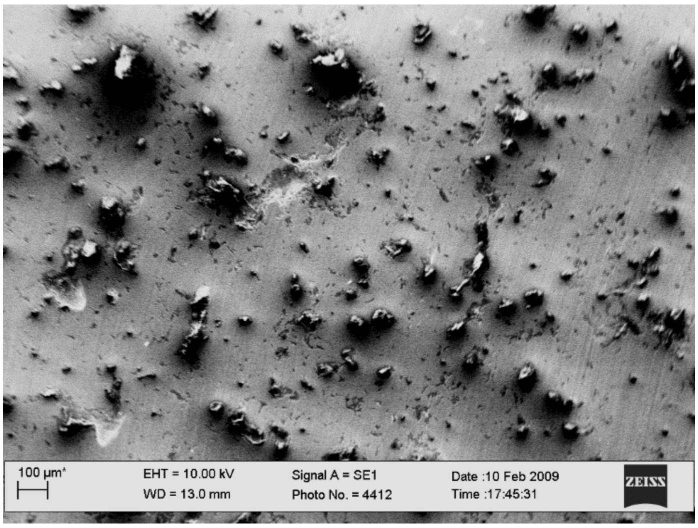


а Ra = 0,25 μм б Ra = 0,08 μм

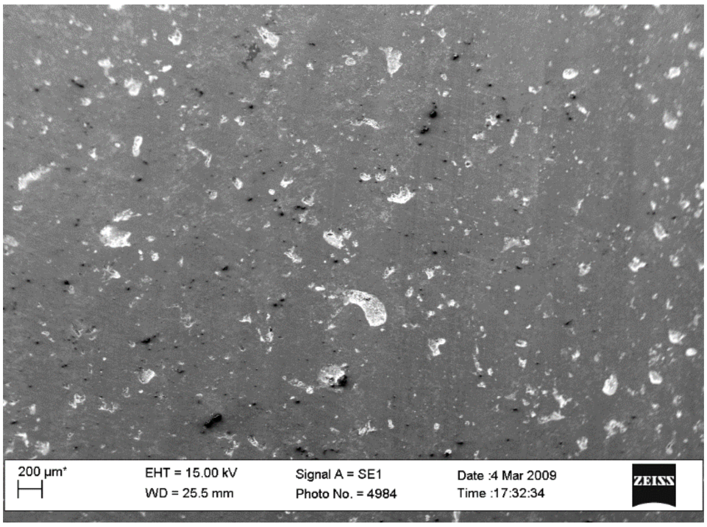
Рис. 8. Шорсткість шліфованої та полірованої поверхні зразків:
а – ЕДП з ПД 140Х14Н2 отриманого за тиску розпилу 0,8 МПа; б – сталі

Істотно менша кількість виступів формується на поверхні покриття із ПД 140Х24Р3ГС2Ю, 140Х14Н2Т2Ю (рис. 9, *б*, *в*). Ці виступи сформовані переважно із суміші оксидів алюмінію та титану, оскільки бориди ферохрому фактично повністю розчиняються у розплаві оболонки внаслідок додатків нікельхромбору або ферокремнію у шихту ПД, які утворюють евтектику із сталевою оболонкою, яка сприяє розчиненню тугоплавких боридів. Однак такі виступи є доволі пологими та меншою мірою утворюють різальні крайки на поверхні покриття під час тертя.

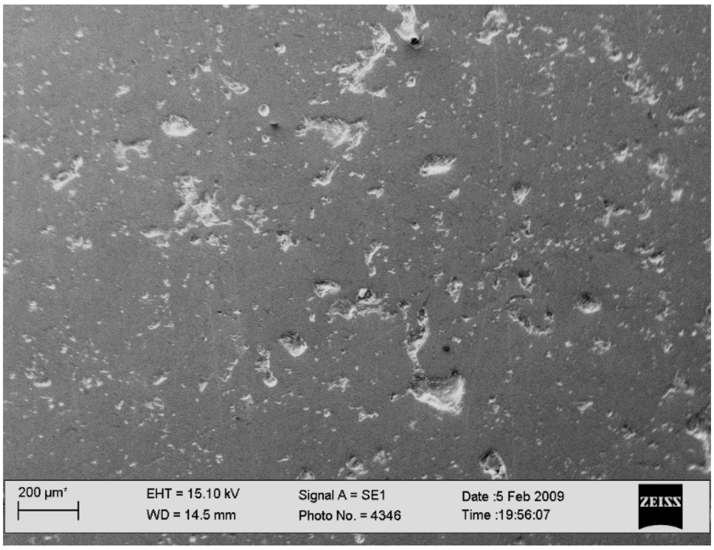
Із технології оброблювання ріжучим інструментом відомо, що характер взаємодії абразивного зерна (для покриття – це виступи карбідів або оксидів над поверхнею) з поверхнею контртіла (у нашому випадку – це бронза) залежить від співвідношення h/p (де h – глибина врізання абразивного виступу в поверхню контртіла під час тертя, а p – радіус заокруглення виступу). Коли співвідношення $h/p < 0{,}02$, то відбувається тільки пружна взаємодія виступу з поверхнею контртіла з подальшим відновленням деформованого шару. Коли ж $0{,}02 < h/p < 0{,}7$, то на поверхні контртіла утворюються сліди у вигляді доріжок з пластичним витискуванням металу на їх краї. Коли ж $h/p > 0{,}7$, то утворюється мікростружка. На покриттях з ПД140Х14, на поверхні яких після шліфування утворюються виступи із карбідів та оксидів, мікростружка утворюється за питомого тиску понад 10 МПа. Зменшення виступів на поверхні покриттів прямо підвищуватиме зносостійкість під час тертя в умовах граничного мащення.



а



б



в

Рис. 9. Фото шліфованої поверхні досліджуваних покриттів, що отримані з ПД: а – ПД 140Х14; б – 140Х24Р3ГС2Ю; в – 140Х14Н2Т2Ю

Поруватість покриттів істотно впливає на зносостійкість як покриття, так і контртіла. На рис. 10 показано результати зносостійкості пари тертя покриття із ПД 140Х14Н2Т2Ю – контртіло БрС-30 в умовах граничного мащення оливою М14В2 із додатком 2 % кварцового піску з максимальним розміром 100 μм. Із збільшенням розміру пор від 50 до 300 μм зносостійкість контртіла із бронзи БрС-30 зменшується втричі, а покриття – на 40 %. Береги пор є ріжучими кромками, а самі пори стають не тільки ємностями, для мастила, а також ємностями, де концентруються великі фрагменти покриття, які зруйнувались під час тертя, та частинки абразиву – піску.

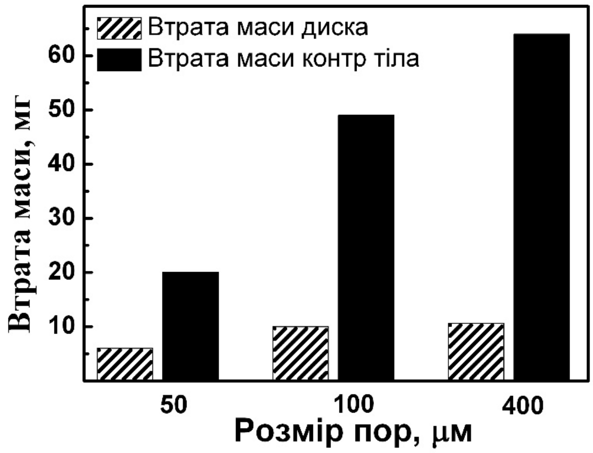
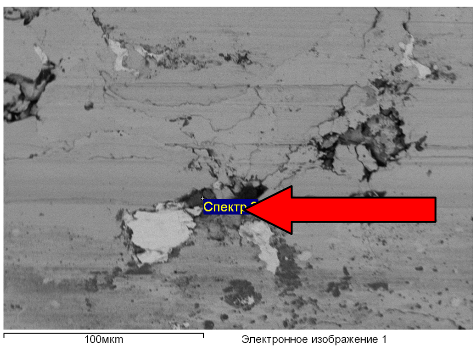


Рис. 10. Вплив розміру пор на зносостійкість пари тертя ПД140Х14Н2Т2Ю – БрС-30

На рис. 11 показано фрагмент мікроструктури покриття, де у порах покриття є зрізані частинки бронзи. Це ті причини, які підвищують знос м’якішого контртіла.



Елемент	Масовий %
O	44.79
Al	55.21

Бронза

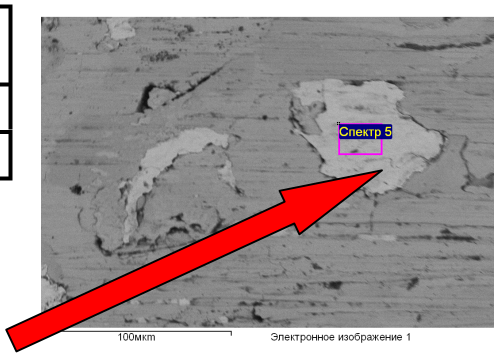


Рис. 11. Мікроструктура ЕДП після випробувань на тертя зношування

Висновки. Металографічним аналізом встановлено, що структура шліфованої поверхні покриття – це композит, де чергуються металеві ламелі та ламелі із оксидів, а також пори.

Об’ємна кількість оксидів у покриттях коливається у межах від 6 до 20 %, залежно від кількості та хімічного складу легувальних елементів. Максимальний вміст оксидів спостерігається під час додавання у шихту ферофосфору, ферохрому та феротитану.

Встановлено, що шорсткість напиленого нешліфованого покриття зменшується з підвищенням тиску розпилу повітряного струменя під час напилення покриття на сталеву основу від Rz 85 за тиску 0,4 МПа до Rz 55 – за тиску 0,65 МПа. Аналогічною є поведінка шліфованих поверхонь: із зростанням тиску повітряного струменя шорсткість зменшується.

Показано, що із ростом тиску повітряного струменя розмір структурних складових поверхні покриття зменшується, при цьому його зносостійкість за умов граничного змащення зростає.

1. Pokhmurskyi V. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / V. Pokhmurskyi, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyy, O. Student, *B. Wielage, H. Pokhmurska // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – No. 22, Iss.5. – P. 808–819. 2. Wielage B. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyy, V. Pokhmurski // Surface and coating technology. – 2013. – No. 220. – P. 27–35. 3. Pokhmurskyi V. Electrochemical properties of arc sprayed coatings from cored wires on the basis of cheap ferroalloys / V. Pokhmurskyi, M. Student, N. Chervinska, T. Stupnytskyy // Ochrona przed korozja. – 2013. – No. 11. – P. 516–518. 4. Похмурський В. Газоабразивная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металлизацией / В. Похмурский, М. Студент, А. Похмурская, И. Рябцев, В. Гвоздецкий, Т. Ступницкий // Автоматическая сварка. – 2013. – № 6. – С. 16–23. 5. Похмурський В. Структура, механічні та електрохімічні характеристики корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, Н. Червінська // Наукові нотатки. – 2013. – 2, № 41. – С. 127–132. 6. Похмурський В. Засади створення корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, Н. Червінська, А. Кондир // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Спецвип. № 9, Т. 2. – С. 600–606.*