

Студент М.М.,
Винар В.А.,
Головчук М.Я.,
Закієв В.І.,
Гвоздецький В.М.,
Гушак Р.І.

*Фізико-механічний інститут

ім. Г.В. Карпенка НАНУ, м. Львів, Україна

**Національний авіаційний університет,

м. Львів, Україна

***Львівський національний аграрний

університет, м. Львів, Україна

E-mail: vynar.va@gmail.com

ОЦІНЮВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОЇ ГЕТЕРОГЕННОСТІ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОІНДЕНТУВАННЯ ТА ЛОКАЛЬНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

УДК 620.178.153.2

Встановлено, що внаслідок електродугового наплення порошкового дроту ПД280X21СГМФ на підкладку зі сталі 3 формується гетерогенна структура, яка містить ламелі матричної фази Fe₃O₄ та складні оксиди заліза та хрому. Показано, що розподіл мікромеханічних характеристик у покриттях залежить від природи їх структурних складових, їх розмірів та розташування. Зокрема, оксиди хрому сприяють зростанню мікротвердості, модуля пружності та напруженя другого роду, а оксиди заліза знижують ці характеристики. Опір зношуванню та механізм руйнування покриттів з ПД визначається структурними параметрами, їх мікрогетерогенністю та мікромеханічними характеристиками.

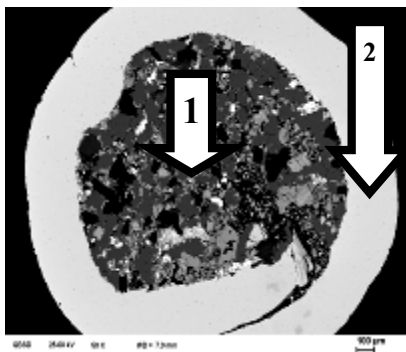
Ключові слова: газотермічні покриття, мікроіндентування, локальний спектральний аналіз, мікротвердість, напруження, зношування.

Вступ

Використання порошкових дротів (ПД) для формування електродугових покриттів (ЕДП) дозволяє розширити сферу їх застосування завдяки підвищенню зносостійкості та корозійної тривкості [1, 2]. Для таких покриттів характерна висока структурна гетерогенність, оскільки через швидкоплинність процесів плавлення у дузі шихтові матеріали не встигають повністю розчинитись у розплаві оболонки ПД і не утворюють загальної ванни, а отже формується гетерогенний за хімічним складом розплав, при диспергуванні якого на краплини формується електродугове покриття [1-4]. Основними причинами виникнення гетерогенності покриттів є параметри напильовання (дистанція, діаметр дроту і тиск струменя газу) та хімічний склад шихти ПД. Краплини, які утворюються під час диспергування розплаву ПД струменем повітря, відрізняються за хімічним складом, а відповідно відрізняються і структурні складові покриттів та їх характеристики (твердість, пружність, пластичність тощо), які, в свою чергу, відповідають за триботехнічні властивості і функціональне призначення.

Матеріали та методи досліджень

Покриття отримували методом електродугового наплення на підкладку зі сталі 3 шляхом розпилення електродного порошкового дроту ПД280X21СГМФ Ø2,6 мм в оболонці зі сталі 08кп наповненої шихтою (рис.1). Хімічний склад дроту наведений у таблиці 1.



Таблиця 1

Хімічний склад порошкових дротів

Елемент	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	W
Вміст, % мас	74,4	2,8	0,3	0,4	0,02	0,03	21,1	0,6	0,42

Рис. 1 – Конструктивне виконання ПД:
1 – сталева оболонка, 2 – шихта

За шихтові матеріали в роботі вибрали доступні, широкоживані і недорогі матеріали для виробництва ПД, а саме феросплави (ферохром, феромарганець, феромолібден).

Процес нанесення ЕДП на зразок передбачає такі операції: знежирення зразка, його струминне оброблення корундом, напилювання та контроль його якості і, нарешті, шліфування та полірування зразка. Параметри напилювання: сила струму 150 А, робоча напруга 32 В, віддаль від сопла до поверхні напилювання – 150 мм, тиск стисненого повітря 0,65 МПа.

ЕДП властива гетерогенна структура, ступінь гетерогенності якої було запропоновано оцінювати за величиною коефіцієнта мікрогетерогенності (K_{MG}), згідно формули:

$$K_{MG} = \left(\sum_{i=1}^n |c_{сер} - c_i| \right) / \eta c_{сер}$$

де n – кількість прямокутних ділянок площею $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, виділених на фото мікроструктури ЕДП, на яких за допомогою спектрального аналізу визначається вміст кожного елемента c_i в межах окремої ламелі та середній вміст елемента $c_{сер}$ покриття.

Коефіцієнт K_{MG} характеризує відхилення вмісту кожного з елементів легування в межах окремої ламелі c_i від його вмісту у покритті і загалом свідчить про повноту сплавлення шихти та оболонки. Для визначення коефіцієнта K_{MG} порівнювали інтегральний вміст конкретного елемента легування $c_{сер}$ на ділянці площею 10 мм^2 з його локальним вмістом c_i на прямокутних ділянках площею $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, які за величиною сумірні з середньою площею ламелей у покриттях. Визначення K_{MG} покриття проводиться як мінімум на десяти ділянках, розташованих одна від одної на відстані 5 мм, по ширині плями пучка напилення, яка становить 25...30 мм. Значення K_{MG} із цих ділянок усереднюються.

МікрOMEХАНИЧНІ властивості поверхневих шарів покриттів визначали методом динамічного ідентування [5]. Він ґрунтується на автоматичній реєстрації діаграми навантаження $P = f(h)$, де P – навантаження на індентор, h – глибина його впровадження у поверхню досліджуваного матеріалу (рис. 2). Основна перевага методу полягає в тому, що твердість визначається в момент максимального заглиблення наконечника (h_{max}), тобто до початку пружного відновлення матеріалу. Діаграма дає інформацію про роботу, витрачену індентором на подолання опору матеріалу $A_{пласт}$ (площа під гілкою навантаження) і роботу, витрачену матеріалом на відновлення своїх властивостей $A_{пруж}$ (площа під гілкою розвантаження) (рис. 2).

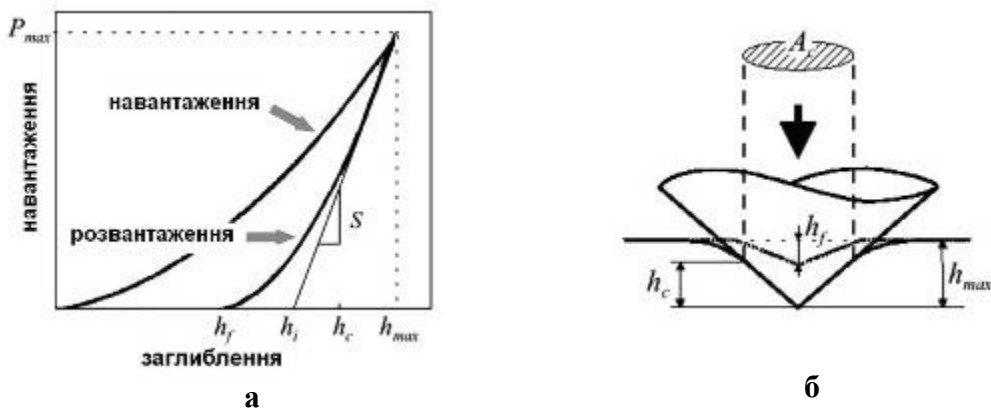


Рис. 2 – Діаграма навантаження (а) і переріз відбитка (б) при динамічному ідентуванні:
 h_{max} , h_c , h_f – максимальне заглиблення наконечника, пружна і пластична складові деформації,
 S – тангенс кута нахилу початкової ділянки гілки розвантаження.

За цими даними визначають ступінь пластичності поверхні ε згідно формули $\varepsilon = (A_{пласт} - A_{пруж}) / A_{пласт}$. Значення мікротвердості за Меєром знаходиться як відношення максимального навантаження P_{max} до площі проекції відбитка A ; модуль Юнга визначається, як $E = S / 2\sqrt{\pi/A}$, де S – тангенс кута нахилу початкової ділянки кривої розвантаження.

Зносотривкість наплавлених шарів за зношування незакріпленим абразивом оцінювали згідно з ГОСТ 23.208-79. Для визначення зносу покриття закріпленим абразивом використали абразивний круг СМ-2 на керамічній зв'язці. Лінійна швидкість тертя становила 0,8 m/s за навантаження в зоні лінійного контакту 1,5 кН. Оцінювали знос після однакової довжини випробувального шляху 720 м за зміною маси зразків.

Для вивчення структури та локального хімічного складу використовували електронний мікроскоп EVO-40XVP (Carl Zeiss) з системою рентгеноспектрального мікроаналізу INCA Energy). Рентгенофазовий аналіз проводили за масивами рентгенівських дифракційних даних, отриманих на рентгенівському дифрактометри-дифрактографі ДРОН-2.0М.

Результати досліджень та їх обговорення

В результаті напилення формується покриття, структура якого є гетерофазною системою (рис. 3), що складається з матричної фази Fe₂O₃ та декількох відокремлених границями розділу оксидних фаз, які відрізняються за хімічним складом і властивостями. Вміст хрому у ламелях покриття коливається в межах 16,4...20,3 мас. % при середньому вмісті у покритті 20,23 мас. %. За такого легування шихти ПД кількість кисню у покритті складає 3,09 % і він практично весь зв'язаний у оксидах (рис.3). Розплавлені частинки транспортуються швидкісним струменем повітряного потоку і при зіткненні з поверхнею підкладки розплющуються і перемішуються. В результаті формується специфічна хвиляста мікроструктура із залишковою поруватістю. Таким чином в результаті напилення формується гетерогенна система з різним хімічним складом та мікромеханічними характеристиками.

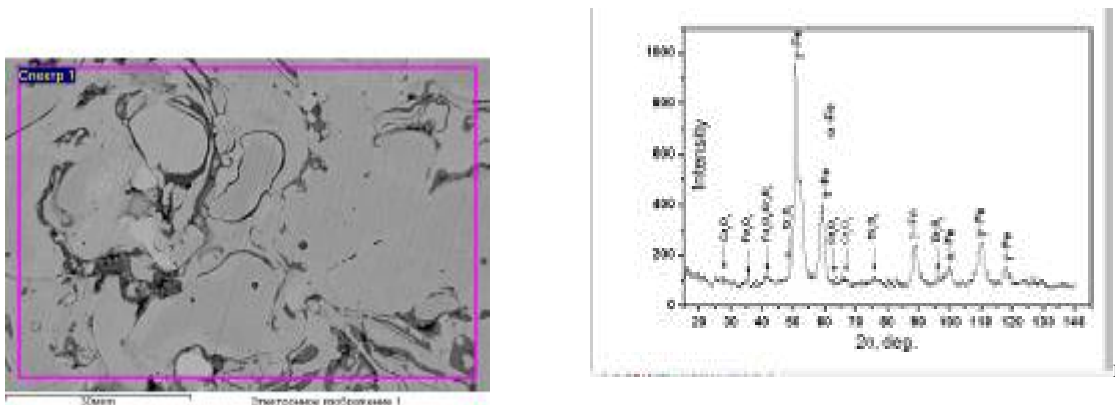


Рис. 3 – Структура (а), хімічний склад (б) та дифрактограма (в) покриття із ПД 280X21СГМФ.

а

Елемент	O K	Si K	V K	Cr K	Fe K	W M
Ваговий, %	3.09	0.68	0.85	20.23	70.34	0.80

б

В результаті індентування за діаграмою $P = f(h)$ (навантаження – заглиблення) можна визначити ряд характеристик локальних ділянок покриття, зокрема мікротвердість $H_{\text{Мейер}}$, модуль пружності E , ступінь пластичності матеріалу ϵ та напруження II-го роду. Так було проведено індентування 12 локальних ділянок з кроком між відбитками 50 мкм, побудовано діаграми, згідно яких визначено механічні характеристики усіх досліджуваних ділянок покриття (табл. 2)

Таблиця 2

Механічні характеристики локальних ділянок електродугового покриття

Номер відбитку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Середнє значення
Мікротвердість $H_{\text{Мейер}}$, ГПа	7,597	6,538	3,401	5,426	6,491	6,735	9,091	6,636	7,01	7,559	6,014	6,442	6,580
Модуль пружності E , ГПа	132,8	129,4	83,0	117,9	124,4	132,7	120,3	105,1	123,2	131,3	119,1	136,5	121,308
Ступінь пластичності	0,641	0,648	0,65	0,67	0,663	0,633	0,571	0,61	0,633	0,649	0,601	0,65	0,635

напруження II-го роду	1,442	1,287	0,705	1,094	1,266	1,324	1,568	1,221	1,336	1,432	1,184	1,291	1,263
-----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Встановлено, що середнє значення мікротвердість $H_{Мейєр} = 6,580$ ГПа, модуля пружності 121,308 ГПа, ступінь пластичності покриття 0,635 і напруження II-го роду складають 1,263 ГПа, однак між різними локальними ділянками індентування існує суттєва відмінність мікромеханічних характеристик. Наприклад, різниця між максимальним і мінімальним значенням мікротвердості становить 5,6 ГПа, така ж тенденція спостерігається і для інших мікромеханічних характеристик покриття. Тому для виявлення впливу структурних складових покриття на зміну мікромеханічних характеристик було зроблено електроннометалографічні дослідження відбитків індентора в BSD – випромінюванні та локальний хімічний аналіз окремих ділянок відбитку (рис.4) і для них побудовані графіки механічних властивостей (рис.5). Показано, що важливу роль у розподілі мікромеханічних характеристик відіграє утворена в процесі нанесення покриття оксидна фаза (рис. 4). Так для досліджуваного покриття характерне утворення складних оксидів з підвищеним вмістом хрому товщиною до 1 мкм (відбитки 1, 6, 7, 9, 10), які позитивно впливають на властивості покриття.

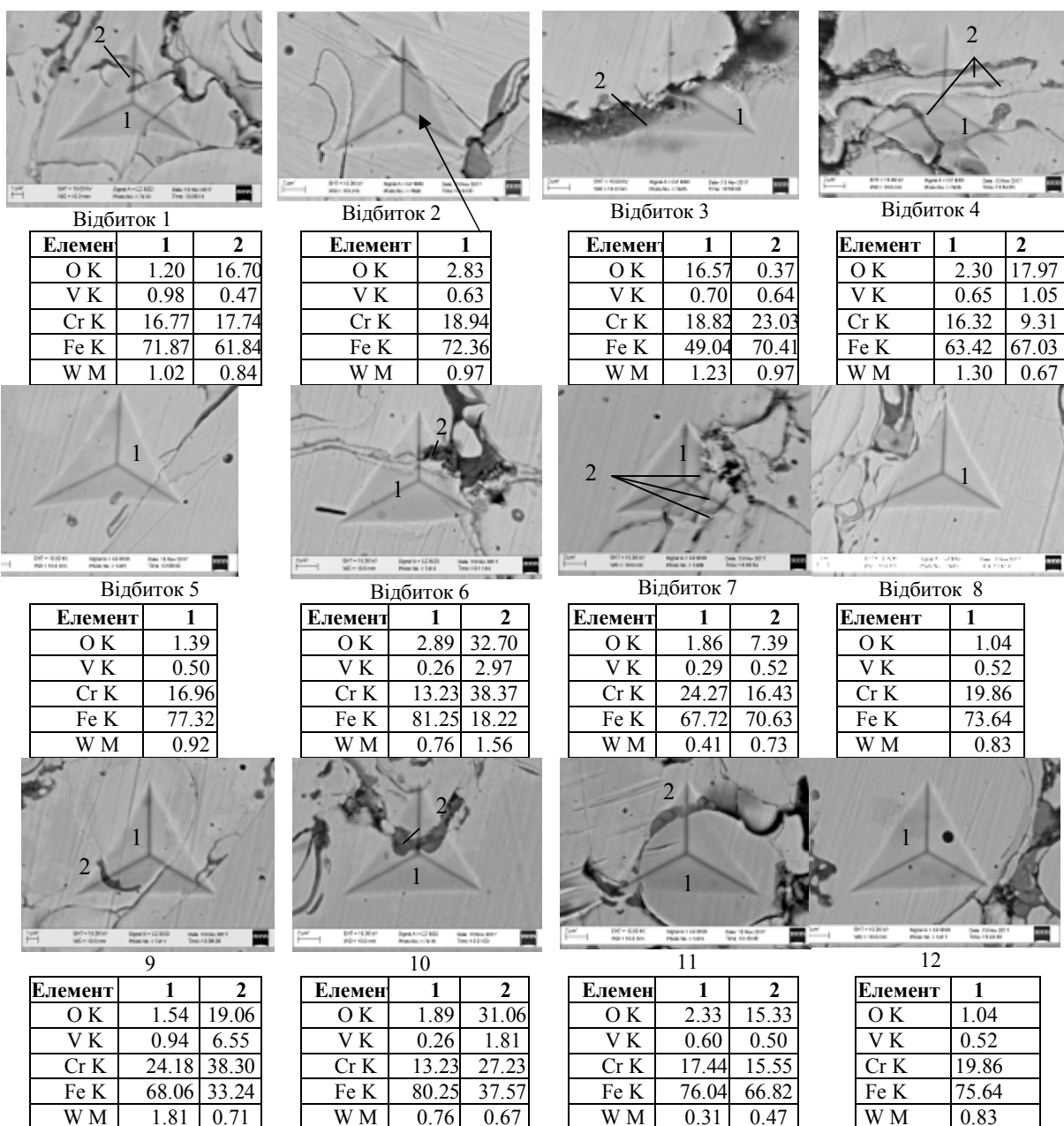


Рис. 4 – Електронномікроскопічне зображення відбитків пірамідки Берковича після динамічного індентування та локальний хімічний аналіз ділянок відбитку покриття ПД 280X21СГМФ.

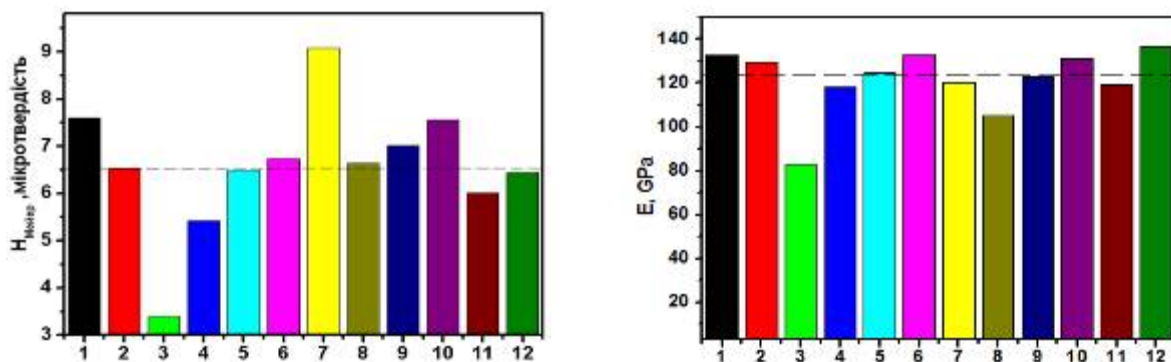


Рис. 5 – Розподіл мікротвердості (а) та модуля пружності (б) локальних ділянок електродугового покриття ПД 280X21СГМФ з кроком між відбитками 50 мкм, 1-12 – номер відбитка

Однак присутність оксидів заліза різної форми та розмірів (відбитки 3, 4, 11) негативно впливає на твердість, пружність та напруження у покритті. Матрична фаза Fe_y без оксидів має середні значення мікротвердості та модуля пружності (відбитки 2, 5, 12). Виявлено, що нанорозмірні границі ламелей, які знаходяться на межі відбитків, несуттєво впливають на досліджувані характеристики, а в деяких випадках дещо підвищують їх. Таким чином розподіл мікромеханічних характеристик у гетерогенних електродугових покриттях суттєво залежить від природи структурної складової, їх розмірів та розміщень, що в свою чергу буде суттєво впливати і на триботехнічні характеристики, зокрема на опір абразивному зношуванню.

Встановлено, що збільшення хімічної та мікромеханічної мікрогетерогенності покриттів сприяє зростанню абразивної зносостійкості за випробувань закріпленим абразивом та зменшує її за випробувань незакріпленим абразивом. (рис. 6.а). Це зумовлено різними механізмами зношування. Зокрема, за випробувань закріпленим абразивом останній рівномірно зношує всю поверхню покриття, а зносостійкість забезпечують тверді ламелі в його структурі. У цьому випадку зносостійкість покриття визначається кількістю і твердістю його структурних складових, які також забезпечують низький рівень напружень розтягу.

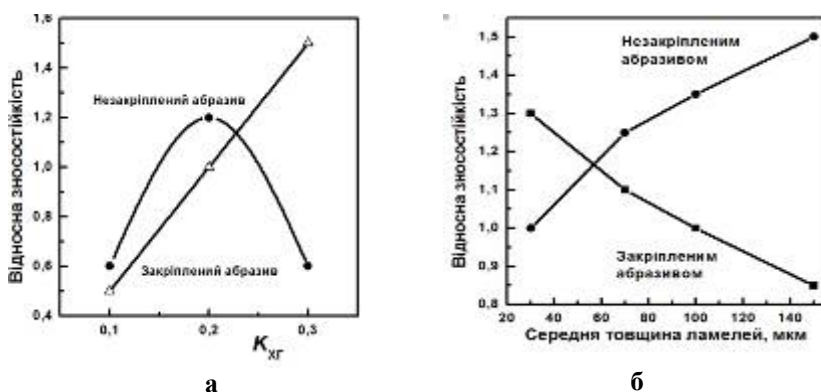


Рис. 6 – Вплив коефіцієнта мікрогетерогенності K_{MG} (а) та середньої товщини ламелей (б) на відносну абразивну зносостійкість покриттів під час тертя закріпленим і незакріпленим абразивом.

За випробувань незакріпленим абразивом вільні частинки насамперед зношують пластичні ламелі покриття та руйнують крихкі компоненти. При цьому тверді ламелі втрачають зв'язок із матрицею покриття та видаляються. Тому гетерогенні покриття з високою мікромеханічною гетерогенністю та високим коефіцієнтом K_{MG} , що мають тверді і пластичні складові (ламелі) виявляють низьку зносостійкість. Зі зменшенням мікрогетерогенності покриттів їх зносостійкість зростає. Водночас при $K_{MG} < 0,2$ зі зменшенням різниці між мікромеханічними характеристиками ділянок у покритті зростають залишкові колові напруження розтягу. За напружень ~ 100 МПа у покритті виникає мережа мікротріщин і руйнування відбувається шляхом їх росту та викиршування цілих ламелей. Зносостійкість при цьому суттєво знижується.

Залежно від режимів напилювання у покритті формуються ламелі різної товщини з різними міжламелярними границями. В міру збільшення товщини ламелей зносостійкість покриттів знижується за випробувань закріпленим абразивом та зростає за випробувань незакріпленим абразивом (рис. 6.б). Чим менша товщина ламелей, тим більше міжламелярних меж, які є слабким місцем при терті з незакріпленим абразивом. У цьому випадку зношування інтенсифікується саме вздовж меж ламелей.

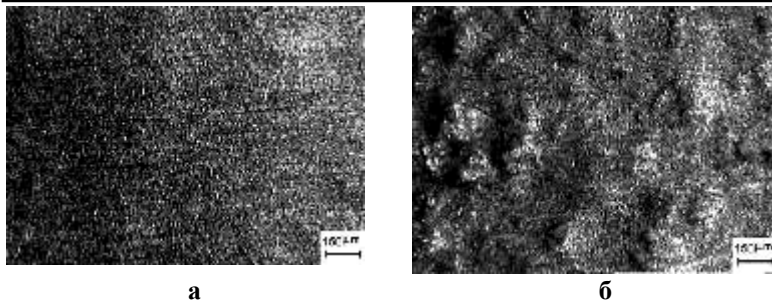


Рис. 7– Топографія поверхонь тертя покриття ПД280Х21СГМФ після випробувань із закріпленим (а) та незакріпленим абразивом (б).

На поверхні тертя, утвореної за випробувань незакріпленим абразивом (рис. 7) виявлено характерні однаково орієнтовані подряпини від абразиву та рівномірне зношування. Водночас у всіх покриттів (особливо, гетерогенних) виявлено виступи та заглибини на поверхні тертя та нерівномірне зношування.

Отже визначальними для опору зношуванню та рельєфу зони фрикційної взаємодії покриттів з абразивом є величина ламелей, їх хімічна неоднорідність, яка спричиняє відмінності між мікромеханічними характеристиками ділянок, а також кількість міжламелярних границь.

Висновки

1. Встановлено, що внаслідок електродугового напилення порошкового дроту ПД280Х21СГМФ на сталі 3 формується гетерогенне покриття, що складається з ламелей матричної фази Fe_у та складних оксидів заліза та хрому. Вміст хрому у ламелях покриття коливається в межах 16,4...20,3 мас. % при середньому вмісті у покритті 20,23 мас. %.

2. Показано, що розподіл мікромеханічних характеристик у гетерогенних електродугових покриттях залежить від природи, розмірів та розміщення їх структурних складових. Зокрема, оксиди хрому сприяють зростанню мікротвердості, модуля пружності та напружень другого роду, а оксиди заліза знижують ці характеристики.

3. Опір зношуванню та механізм руйнування покриттів з ПД визначається структурними параметрами, їх мікрогетерогенністю та мікромеханічними характеристиками.

Література

1. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2005. – 190 с.
2. Застосування електродугової металізації порошковими дротами системи Fe-Cr-C-Al для відновлення деталей машин / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, І.Й. Сидорак // *Машинознавство*. – 1999. – № 1. – С. 13–18.
3. Похмурський В. Електрохімічні характеристики електродугових покриттів із порошкових дротів з підвищеним вмістом хрому / В. Похмурський, Н. Червінська, Т. Ступницький // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. – 2013. – №13 (202). – С. 37–44.
4. Вплив тертя на фазові перетворення у поверхневих шарах газотермічного покриття FeCrV+Al / М.М. Студент, В.М. Довгунік, І.Й. Сидорак, Г.В. Похмурська, О.І. Яськів // *Фіз. - хім. механіка матеріалів*. – 2000. – 36, № 4. – С. 109-111.
5. Винар В.А. Зміна мікромеханічних властивостей нікелю та його трибологічної поведінки в результаті електролітичного наводнювання // В.А. Винар // *Проблеми трибології*. – 2015. – №4. – С. 75-80

Поступила в редакцію 27.03.2018

Student M.M., Vynar V.A., Golovchuk M.Ya., Zakiev V.I., Gvozdetsky V.M., Gushchak R.I.
Evaluation of micromechanical heterogeneity of gas-thermal coatings by using the microindentation and local spectral analysis

A heterogeneous electric arc coating consisting of matrix phase Fe γ lamellas and complex oxides of iron and chromium are formed as a result of electric arc spraying of powdered wire PD280X21SCGMP. The content of chromium in the coating lamellae varies from 16.4 to 20.3 wt. % with a typical content of 20.23 wt. %

It is shown that the distribution of micromechanical characteristics in heterogeneous electric arc coatings depends on the nature, size and location of their structural components. In particular, chromium oxides contribute to the growth of microhardness, the modulus of elasticity and stresses of the second kind, and iron oxides reduce these characteristics.

Wear resistance and the mechanism of coatings destruction is determined by structural parameters, their microheterogeneity and micromechanical characteristics.

Key words: gas-thermal coatings, microindentation, local spectral analysis, microhardness, wear.

References

1. Elektrodugovi vidnovni ta zahysni pokryttja / V.I. Pohmurs'kyj, M.M. Student, V.M. Dovgunyk, G.V. Pohmurs'ka, I.J. Sydorak. – L'viv: Fiz.-meh. in-t im. G.V. Karpenka NAN Ukrainy, 2005. – 190 s.
2. Zastosuvannja elektrodugovoi' metalizacii' poroshkovymy drotamy systemy Fe-Cr-C-Al dlja vidnovlennja detalej mashyn / V.I. Pohmurs'kyj, M.M. Student, V.M. Dovgunyk, I.J. Sydorak // Mashynoznavstvo. – 1999. – № 1. – S. 13–18.
3. Pohmurs'kyj V. Elektrohimični harakterystyky elektrodugovyh pokryttiv iz poroshkovykh drotiv z pidvyshhenym vmistom hromu / V. Pohmurs'kyj, N. Chervins'ka, T. Stupnyc'kyj // Visnyk Shidnoukrai'ns'-kogo nacional'nogo universytetu imeni V. Dalja.–2013.–№13 (202).–S. 37–44.
4. Vplyv tertja na fazovi peretvorennja u poverhnevyyh sharah gazotermichnogo pokryttja FeCrB+Al / M.M. Student, V.M. Dovgunyk, I.J. Sydorak, G.V. Pohmurs'ka, O.I. Jas'kiv // Fiz. - him. mehanika materialiv. – 2000. – 36, № 4. – S. 109-111.
5. Vynar V.A. Zmina mikromehanichnyh vlastyvostej nikelju ta jogo trybologichnoi' povedinky v rezul'tati elektrolitychnogo navodnjuvannja //V.A. Vynar // Problemy trybologii'. – 2015. – №4. – S. 75-80.