

ВПЛИВ СКЛАДУ ШИХТИ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИВІВ

Г. В. ПОХМУРСЬКА¹, М. Я. ГОЛОВЧУК², Ю. В. ДЗЬОБА³,
В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ³, Л. В. ДЗЮБИК¹

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного;

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено вплив діаметра порошкового дроту (ПД) на структуру, механічні характеристики та абразивну зносотривкість електродугових покривів. Шихту електродних матеріалів сформовано із матеріалів у вигляді порошоків хрому, ферохрому або ферохромбору. Виявлено, що зі збільшенням діаметра ПД та сили струму мікротвердість покривів зростає незначно, а зі збільшенням дистанції напилення у них підвищується вміст оксидної фази. За діаметра ПД 1,8...2,4 mm абразивна тривкість покривів зменшується несуттєво. З додатком до них 3 mass% молібдену та бору збільшуються мікротвердість, зносотривкість, когезивна міцність, а також забезпечується сплавлення краплин. Зносотривкість покриву поліпшується за вмісту у ПД до 2 mass% вуглецю та до 3 mass% бору. За оптимального вмісту бору до 3 mass% мікротріщини не утворюються.

Ключові слова: електродуговий покрив, порошкові дроти, ламелі, краплини.

Для захисту різноманітного обладнання від абразивного зношування у промислово розвинутих країнах в останні роки все частіше застосовують методи газотермічного нанесення покривів [1–3], що пов'язано з їх дешевизною та продуктивністю проти інших методів. Вживаючи порошкові дроти (ПД) як електродні матеріали, можна досягти таких самих властивостей електродугових покривів, як і плазмових [4, 5]. Для виготовлення ПД перспективні дешеві боровмісні шихтові матеріали системи Fe–Cr–B–C–Al з додаванням інших легувальних елементів [6–8]. Проте недостатньо вивчено вплив складу шихти ПД та їх діаметра на структуру та властивості покривів.

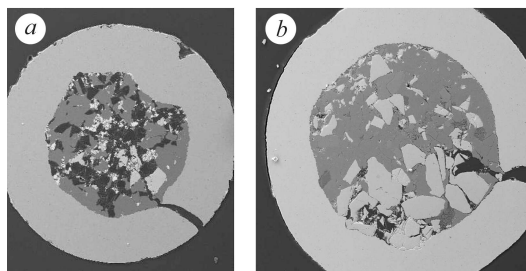
Методика експериментів. ПД для електродугового напилення покривів виготовляли в оболонці з низьковуглецевої сталі із наповнювачем – шихтою із порошоків металів та сплавів (рис. 1). Зі збільшенням діаметра ПД масовий вміст шихти зростає, що дає можливість змінювати склад ПД та покриву в широких межах. Для напилювання зносотривких (особливо корозійнотривких) покривів необхідно забезпечити підвищений вміст порошоків хрому, ферохрому або ферохромбору. Для цього потрібні ПД більшого діаметра, але тоді міняються умови їх плавлення, формування розплаву на торцях, диспергування розплаву на краплини, із яких утворюється напилений покрив. Отже, діаметр ПД та компонентний склад шихтових матеріалів суттєво змінюватимуть фізико-механічні та трибологічні характеристики покривів. Щоб визначити цей вплив, виготовили експериментальні ПД різного хімічного складу (табл. 1).

Формували покриви методом електродугового напилення із електродних ПД діаметром 1,8 та 2,4 mm за режимів, вказаних у табл. 2. ПД 50X6Г2МС (рис. 1) напилюють покриви, щоб відновити деталі зношених посадкових місць валів під

шестерні, підшипники кочення, різноманітні втулки тощо. Вони мають невисоку твердість, яку визначають за навантаження 200 г, та легко обробляються лезовим інструментом. ПД 50ХН2ГР5С із підвищеним вмістом бору та великою твердістю напилюють зносотривкі покриття, а ПД 250Х20ВФГС зі збільшеним вмістом вуглецю та хрому – зносо- та корозійнотривкі. Вони придатні для захисту нових деталей та відновлення тих, що експлуатуються в умовах корозійно-абразивного зношування, а також для заміни небезпечного гальванічного хромування. Електродугові покриття із ПД 50ХН2ГР5С захищають деталі, що експлуатуються в умовах абразивного зношування.

Рис. 1. Поперечний переріз порошкових дротів \varnothing 1,8 (a) та 2,4 mm (b).

Fig. 1. Cross section of powder wires (PW) \varnothing 1.8 (a) and 2.4 mm (b).



Таблиця 1. Хімічний склад порошкових дротів (mass%)

Марка ПД	Діаметр, mm	Fe	C	Si	Mn	P	S	B	Cr
50ХН2ГР5С	1,8	90,589	0,554	0,19	1,09	0,018	0,025	4,91	0,204
50ХН2ГР5С	2,4	91,068	0,452	0,3	1,2	0,025	0,025	4,93	0,22
50Х6Г2МС	1,8	91,654	0,41	0,4	1,56	0,02	0,016	–	5,44
50Х6Г2МС	2,4	90,566	0,469	0,402	1,404	0,013	0,02	–	6,617
250Х20ВФГС	1,8	74,368	2,8	0,3	0,39	0,02	0,025	–	21,1
250Х20ВФГС	2,4	74,002	2,51	0,62	0,38	0,01	0,008	–	21,4
50ХН2ГР5С	3,2	91,068	0,452	0,3	1,2	0,025	0,025	0,22	1,0

Таблиця 2. Параметри нанесення покриттів

Режими напилення		
діаметр ПД, mm	напруга, V	струм, A
1,8	30...32	100; 125; 150
2,4	30...32	120; 150; 180
3,2	30...32	175; 200; 260

Експериментальні результати. Структура напилених покриттів. Покриття із ПД всіх діаметрів мають ламелярну будову (рис. 2), де кожна ламель з'єднана з іншими тонкими оксидними плівками. Зміни структури у покриттях, отриманих за різного струму та на різних дистанціях напилення, не виявили (рис. 2).

Рис. 2. Структура покриттів ($\times 500$) з порошкових дротів за різних режимів напилення: a – 180 A, 80 mm; b – 100 A, 120 mm.

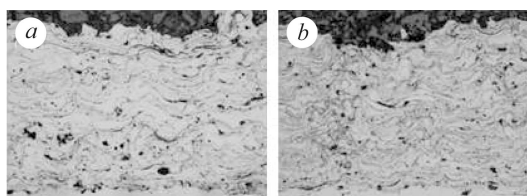


Fig. 2. The PW coatings structures ($\times 500$) at different spray modes: a – 180 A, 80 mm; b – 100 A, 120 mm.

У покриві із ПД 50ХН2ГР5С зароджуються мікротріщини, спричинені охолодженням краплин на поверхні основи через великі напруження розтягу (рис. 3а), які можуть релаксувати внаслідок пластичної деформації, і тому тріщини не зароджуються (рис. 3б). За твердості вище 650 НV пластичної деформації в покриві не зафіксовано, а ці напруження релаксують з утворенням мікротріщин.

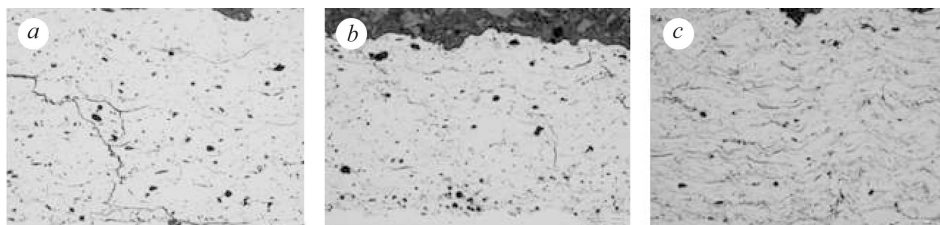


Рис. 3. Структура покривів ($\times 500$) із ПД діаметром 1,6 mm залежно від сили струму (I , А) та дистанції напilenня (mm): 50ХН2ГР5С (а, б) та 250Х20ВФГС (с); а, с – 150 А; 80 mm; б – 100 А; 120 mm.

Fig. 3. Coatings structure ($\times 500$) from PW 1.6 mm in diameter depending on current strength (I , A) and spray distances (mm): 50ХН2ГР5С (а, б) and 250Х20ВФГС (с); а, с – 150 А; 80 mm; б – 100 А; 120 mm.

Зі зростанням дистанції напilenня кількість мікротріщин у покриві з ПД 50ХН2ГР5С зменшується (рис. 3б), а у покриві з ПД 250Х20ВФГС їх не виявили (рис. 3с). Зі зменшенням сили струму знижується продуктивність напilenня, а зі збільшенням віддалі від сопла до сталеві основи – температура краплин, що сприяє формуванню менших напружень розтягу в покривах. У покриві з ПД 250Х20ВФГС мікротріщин не зафіксовано за всіх режимів напilenня (рис. 3с), що зумовлено релаксацією напружень розтягу в пластичні ламелі покриву.

Мікротвердість покривів із ПД діаметром 1,8 і 2,4 mm зі збільшенням сили струму зростає незначно (рис. 4). Поруватість покривів із ПД діаметром 1,8 mm зменшується, а із більшим діаметром зі зростанням сили струму підвищується (рис. 5).

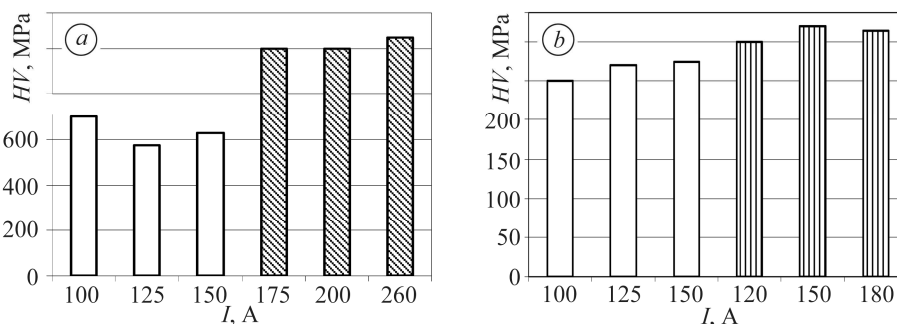


Рис. 4. Зміна мікротвердості покривів залежно від хімічного складу за навантаження 200 g: а – ПД 50ХН2ГР5С; б – ПД 50Х6Г2М; діаметр електродів (mm): □ – 1,8; ▨ – 2,4; ▩ – 3,2.

Fig. 4. Change of coatings microhardness depending on the chemical composition: а – PW 50ХН2ГР5С; б – PW 50Х6Г2М; electrodes diameter (mm): □ – 1.8, ▨ – 2.4, ▩ – 3.2.

Зі збільшенням сили струму адгезивна міцність покривів із ПД діаметром 1,8 mm зростає, а діаметром 2,4 mm зменшується (рис. 6). Зокрема, зносотривкість покривів із ПД 250Х20ВФГС діаметром 1,8 та 2,4 mm зменшується (рис. 7), а також суттєво зростають напруження розтягу, що може викликати появу мікротріщин під час випробувань на зношування абразивом. Проте для ПД 50ХН2ГР5С виявили протилежну тенденцію: зі зростанням сили струму когезивна міцність та зносотривкість покриву підвищується.

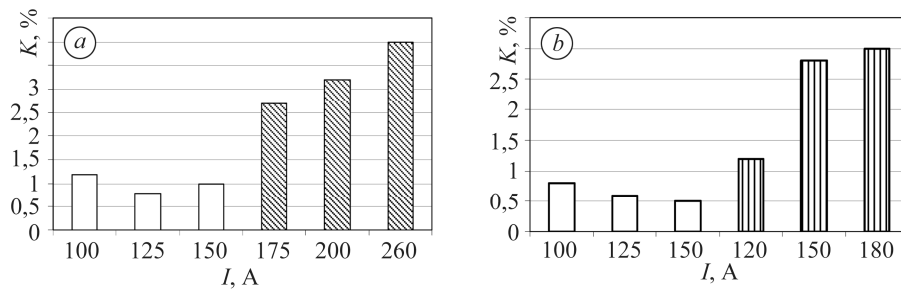


Рис. 5. Зміна поруватості покриттів (K) залежно від струму напilenня (I , А), хімічного складу та діаметра: a – ПД 50XH2ГР5С; b – ПД 50X6Г2М; діаметр електродів (mm):

□ – 1,8; ▨ – 2,4; ▩ – 3,2.

Fig. 5. Change of coatings porosity (K) depending on spraying current (I , A), chemical composition and electrodes diameter: a – PW 50XH2ГР5С; b – PW 50X6Г2М;

electrodes diameter (mm): □ – 1.8; ▨ – 2.4; ▩ – 3.2.

На властивості покриттів впливає не лише діаметр електродних матеріалів, а й вміст та склад компонентів шихти. Досліджували покриття із маловуглецевого ПД 50X6МГС діаметром 2,4 mm зі середнім вмістом хрому, ПД 50XM6ГС зі середнім вмістом молібдену замість хрому, високовуглецевого ПД 120X6ГС зі середнім вмістом хрому та високовуглецевого ПД 120X17ГС із високим вмістом хрому, а також високовуглецевого ПД 90X17РГС із додатком бору (табл. 3).

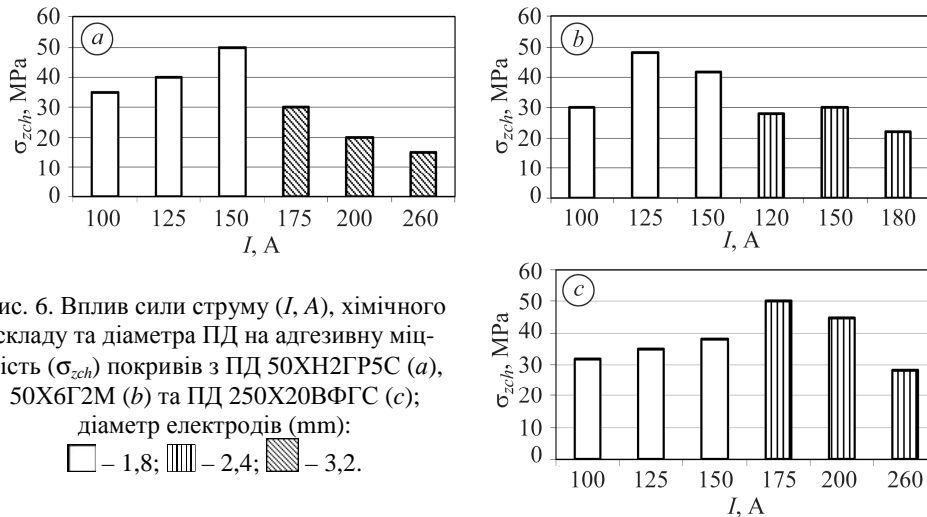


Рис. 6. Вплив сили струму (I , А), хімічного складу та діаметра ПД на адгезивну міцність (σ_{zch}) покриттів з ПД 50XH2ГР5С (a), 50X6Г2М (b) та ПД 250X20ВФГС (c);

діаметр електродів (mm): □ – 1,8; ▨ – 2,4; ▩ – 3,2.

Fig. 6. Influence of the current strength (I , A), chemical composition, and PW diameter on the adhesive strength (σ_{zch}) of PW 50XH2ГР5С (a), PW 50X6Г2М (b) and PW 250X20ВФГС (c) coatings; electrodes diameter (mm): □ – 1.8; ▨ – 2.4; ▩ – 3.2.

Таблиця 3. Вплив хімічного складу на поруватість покриттів та кількість в них оксидної фази

Марка дроту	Поруватість, %	Кількість кисню в покритті, %
50X6МГС	4	9
50XM6ГС	3	7
120X6ГС	4	7
120X17ГС	3	6
90X17РГС	3	5
X16P3CЮ	3	5
50XH2ГР5С	3	5

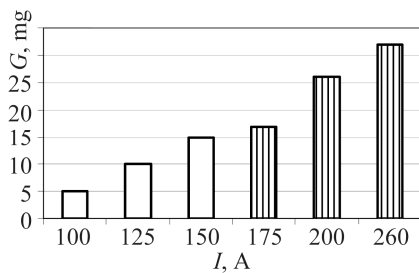


Рис. 7. Знос покриттів із ПД 250X21ВФГС (G – втрата маси; I – струм); з діаметром електродів (mm): □ – 1,8; ▨ – 2,4.

Fig. 7. Wear of PW 250X21ВФГС coatings (G – weight loss; I – current strength); electrodes diameter (mm): □ – 1.8; ▨ – 2.4.

Бор, молібден та вуглець у ПД знижують кількість кисню у покритві. Зокрема, під час транспортування краплин із розплаву ПД до напилюваної поверхні вуглець взаємодіє із киснем з утворенням вуглекислого газу, який захищає краплини металу від інтенсивного окиснення; молібден утворює легкоплавкі оксиди, які, випаровуючись із поверхні розплавлених краплин, оберігають його від впливу кисню, а бор із киснем формує легкоплавкі оксиди, які, покриваючи розплав плівкою, послаблюють його окиснення. Поруватість слабо залежить від хімічного складу досліджуваних покриттів, а зносотривкість – опосередковано від їх твердості (табл. 3). Адже покритв із ПД50ХМ6ГС, що містить молібден, має найменшу твердість, проте високу абразивну зносотривкість. Для напилених зносотривких покриттів важлива не лише їх твердість, а й і висока когезивна міцність (табл. 4).

Таблиця 4. Вплив хімічного складу ПД на твердість та відносну зносотривкість електродугових покриттів

Марка дроту	Твердість, HV	Когезивна міцність, МПа	Відносна зносотривкість
50X6МГС	600	220	1,1
50ХМ6ГС	500	260	1,4
120X6ГС	500	185	1
140X14ГС	900	220	1,25
90X17РГС	700	185	1,4
20X16P3H2CЮ	800	110	1,4
50ХН2ГР5	1000	70	0,8
200X20ГС	1100	210	1,4

Молібден, який вводять у шихту ПД50ХМ6ГС, має високу температуру плавлення, і тому забезпечує сплавлення краплин, підвищуючи когезивну міцність покритву на сталій основі. За наявності бору у покритві утворюються дрібнодисперсні бориди, які підвищують його зносотривкість. Зі збільшенням його вмісту до 5...5,5 mass% (ПД 50ХН2ГР5) твердість покритву суттєво зростає, однак, у ньому формується сітка мікротріщин, через що його опір зношуванню падає.

ВИСНОВКИ

Виявлено, що зі збільшенням діаметра ПД та сили струму мікротвердість покриттів зростає незначно, а з ростом дистанції напилення підвищується вміст оксидів. Сила струму та дистанція напилення для досліджених режимів напилення слабо впливають на зносотривкість покритву, зокрема, зі збільшенням діаметра ПД від 1,6 до 2,4 mm, абразивна тривкість покриттів зменшується несуттєво. З додатком до 3 mass% молібдену та бору у ПД їх мікротвердість та зносотривкість вища і забезпечується сплавлення краплин, що сприяє когезивній міцності. Зносотривкість покриттів зростає за вмісту у ПД вуглецю до 2 mass% та бору до 3 mass%. За оптимального вмісту бору до 3 mass% у покритвах мікротріщини не утворюються та підвищується їх зносотривкість.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние диаметра порошковой проволоки (ПП) на структуру, механические характеристики и абразивную износостойкость электродуговых покрытий. Шихта электродных материалов изготовлена из материалов в виде порошков хрома, феррохрома или феррохромбора. Выявлено, что с увеличением диаметра ПП и силы тока микротвердость покрытий возрастает незначительно, а с ростом дистанции напыления в них повышается содержание оксидной фазы. С увеличением диаметра ПП от 1,8 до 2,4 mm абразивная износостойкость покрытий уменьшается незначительно. С добавлением к ним 3 mass% молибдена и бора повышаются микротвердость, износостойкость и когезионная прочность, а также обеспечивается сплавление капель. Износостойкость покрытия улучшается при содержании в ПП до 2 mass% углерода и до 3 mass% бора. При оптимальном содержании бора до 3 mass% микротрещины не образуются.

SUMMARY. The influence of the diameter of the powder wire (PW) on structure, mechanical characteristics and abrasive durability of the electric arc coatings has been investigated. The charge of electrode materials is fabricated from chromium-containing materials in the form of chromium, ferrochromium or ferrochrombor powders. It was found that the increase of PW diameter and the current strength does not increase the coatings microhardness. The abrasive durability of electric arc furnaces decreases with the increase of PW diameter from 1.8 to 2.4 mm. The addition to 3 mass% of molybdenum and boron into the coating composition provides the fusion of droplets among themselves; the increases of microhardness, wear resistance and cohesive strength. The wear resistance of the coating increases when PW contains up to 2 mass% of carbon and up to 3 mass% of boron mass. For optimal boron content up to 3 mass% microcracks in the coatings do not form.

1. *Оптимізація* вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покривів / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–29.
(*Stupnyt'skyi T. R., Student M. M., Pokhmurs'ka H. V., Hvozdet's'kyi V. M.* Optimization of the chromium content of powder wires of Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coating // Materials science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.)
2. *Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures* / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Syupnyckyj, and V. Pokhmurskii // Surf. & Coat. Techn. – 2013. – **220**. – P. 27–35.
3. *Газообразная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металлизацией* / В. И. Похмурский, М. М. Студент, А. В. Похмурская, И. А. Рябцев, В. М. Гвоздецкий, Т. Р. Ступницький // Автомат. сварка. – 2013. – № 6. – С. 16–23.
4. *Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures* / V. Pokhmurskyi, M. Student, H. V. Pokhmurska, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyu, O. Student, and B. Wielage // J. Thermal Spray Techn. – 2013. – **22**, № 5. – P. 808–819.
5. *Flux-cored wires of FeCrB+Al and FeCr+Al+C systems for electric arc metallizing* / V. I. Pokhmursky, M. M. Student, V. M. Dovgunyk, and I. I. Sidorak // Автомат. сварка. – 2002. – № 3. – P. 28–31.
6. *Структура та властивості алюмінієвих сплавів, лазерно модифікованих карбідом силіцію* / Г. В. Похмурська, М. М. Студент, Н. Р. Червінська, Х. Р. Сметана, А. Ванк, Т. Геніт, Г. Подлесак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 3. – С. 34–40.
(*Pokhmurs'ka H. V., Student M. M., Chervins'ka N. R., Smetana Kh. R., Wank A., Hoenig T., Podlesak H.* Structure and properties of aluminum alloys modified with silicon carbide by laser surface treatment // Materials Science. – 2005. – **41**, № 3. – P. 316–323.)
7. *Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminum coatings* / V. Pokhmurskii, H. Nykforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, M. Grund, and T. Wank // J. Thermal Spray Techn. – 2007. – **16**, № 5–6. – P. 998–1004.
8. *Трибологічні властивості комбінованих металооксидокерамічних шарів на легких сплавах* / М. М. Студент, В. М. Довгунік, М. Д. Клапків, В. М. Посувайло, В. В. Шмирко, А. Р. Киця // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – № 2. – С. 55–64.
(*Student M. M., Dovhunyk V. M., Klapkiv M. D., Posuvailo V. M., Shmyrko V. V., Kytsya A. R.* Tribological properties of combined metal-oxide-ceramic layers on light alloys // Materials Science. – 2012. – **48**, № 2. – P. 180–190.)

Одержано 27.09.2017