

**Студент М.М.,
Гвоздецький В.М.,
Дзьоба Ю.В.**

Фізико - механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів, Україна
E-mail: student-m-m@ipm.lviv.ua

ВПЛИВ ПІДВИЩЕНОГО ТИСКУ ПОВІТРЯНОГО СТРУМЕНЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

УДК: 621.891

DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-33-41

Досліджено умови плавлення та структуру покриттів напилених методом електродугового напилення залежно від тиску повітряного струменю. Визначено вплив тиску повітря на кут розпилення. Встановлено, що зменшення кута розпилення підвищує температуру краплин при формуванні покриттів. Дисперговані розплавом краплини меншого розміру легше захоплюються швидкісним повітряним струменем і при вдарянні об поверхню сильніше деформуються, що зменшує пористість покриттів та підвищує кількість ділянок мікрозварювання ламелей. За підвищення тиску повітряного струменю у покритті зменшується розмір ламелей, зростає кількості оксидної фази, твердість, зносостійкість, рівень колових залишкових напружень першого роду та когезивна міцність.

Ключові слова: порошкові дроти, ламелі покриття, оксидні плівки, абразивна зносостійкість.

Вступ

Серед газотермічних методів отримання покриттів електродугова металізація (ЕДМ) є технологічно найпростішим і найдешевшим методом. Використання останнім часом електродних матеріалів у вигляді спеціальних порошкових дротів (ПД) дало змогу розширити сферу застосування методу електродугової металізації та одержати нові відновні та захисні покриття різного функціонального призначення, з високими експлуатаційними характеристиками [1 - 3]. Проте для електродугових покриттів характерною є висока поруватість – 7 - 10 %, високий рівень залишкових напружень розтягу, низька когезія та адгезія (порівняно із покриттями нанесеними іншими газотермічними методами) [4 - 7]. Останнім часом у світовій практиці ведуться роботи по підвищенню фізико-механічних характеристик покриттів нанесених методом електродугового напилювання. Для цього в ряді робіт стиснуте повітря замінюють на суміш горючих газів із киснем. Такий метод за рахунок підвищення швидкості розплавлених краплин, що формують покриття дозволяє суттєво дозволяє підвищити їх механічні характеристики та зменшити поруватість, однак при цьому значно ускладнюється конструкція обладнання, суттєво зростають енергетичні затрати та собівартість нанесення покриттів.

Постановка проблеми. В даній роботі для підвищення механічних характеристик електродугових покриттів досліджено вплив підвищення швидкості польоту розплавлених краплин при напиленні покриттів за рахунок підвищення тиску повітря від 0,6 до 1,2 МПа, яке подається в систему розпилювання металізатора.

Методики експериментів

Електродугові покриття товщиною 1 мм наносили металізатором ФМІ-2 виробництва Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України. Для напилення покриттів використали електродні матеріали: дріт суцільного перерізу У8, та ПД марок 1-70X18P3 (шихта - порошки FeCr+V₄C); 2-X18P3C2 (шихта - порошки FeCrB+FrSi); 3-X6P3Ю3Mg2 (шихта -порошки FeCrB+AlMg). Вплив компонентів шихти на вміст кисню у покритті визначали за використання ПД – 4-140X14; 5-140X14ФФ; 6-140X14H2ТЮ; 7-140X16P3T2H2; 8-140X16P3. Покриття напиляли за наступних режимів: напруга на дузі U – 32 В, струм I – 150 А, тиск повітря 0,6 ... 1,2 МПа, витрати повітря 1,3 м³/хв, віддаль від дуги до напилюваної поверхні у всіх випадках 120 мм. Перед напиленням зразки піддавали абразивно-струминній обробці корундом. Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3 за навантаження 200 г.

Надзвукову швидкість повітряного струменю, числом Маха 2, отримали за використання сопла Лавала з вертикальним розміщенням двох повітряних каналів та критичним діаметром отворів по 2,2 мм. (рис. 1), довжина надзвукової частини 15 мм [8]. Параметрів сопла Лавала розраховували за формулами:

$$a) \text{ площа поперечного перерізу: } f_i = \frac{G}{\tilde{n}_i \cdot \omega_i};$$

$$\text{б) діаметр: } d_i = \left(\left(\frac{4}{\delta} \right) \cdot \phi_t \right) \cdot 0,5;$$

в) довжина сопла:

$$1) \text{ дозвукова частини } l_1 = (d_i - d_{kp}) / (2 \cdot \text{tg}(\alpha_2/2));$$

$$2) \text{ надзвукова частини } l_2 = \frac{d_i - d_{kp}}{2 \cdot \text{tg} \frac{\alpha_1}{2}}.$$

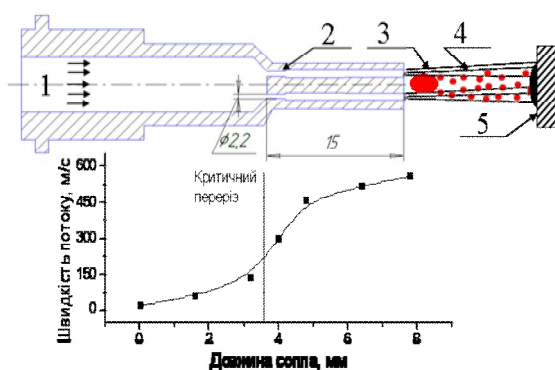


Рис. 1 – Схема сопла для отримання надзвукового потоку:
1 – повітряний потік; 2 – критичний переріз сопла;
3 – розплав з електродних матеріалів; 4 – метало повітряний потік;
5 – стальна підкладка з напиленням покриттям

Віддаль від зрізу сопла до дуги 10 мм.

$$w_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{\gamma - 1} \cdot R \cdot (T_0 - T_1)},$$

де w – швидкість повітряного потоку у соплі;

$$k - \text{показник адіабати } k = \frac{C_p}{C_v};$$

R – постійна газова повітря;

T_0 та T_1 – температура повітряного потоку у дозвуковій та надзвуковій частинах сопла.

Експериментально, швидкість краплин диспергованих повітряним струменем визначали з використанням двох обертових дисків.

З метою визначення температури напилюваної поверхні під час напилення за тиску 0,6 та 1,2 МПа, нанесення покриття виконували нерухомим металізатором протягом 30 с на пластину товщиною 5 мм, на зворотній стороні якої фіксували термопару у отворі на глибині 4 мм. В процесі напилення покриття з електродного дроту масою 300 г, температура на поверхні деталі в плямі напилення змінюється за параболічним законом. За тиску повітря 0,6 МПа була зафіксована максимальна температура 450 °С, а за тиску 1,2 МПа – 600 °С.



Рис. 2 – Схема зразків для визначення когезивної міцності покриттів

Когезивну міцність покриттів визначали на трубчатих зразках (рис. 2), що складаються із двох половинок загальною довжиною 100 мм. Половинки зразків з'єднували між собою болтом з гайкою. На поверхню зразків наносили покриття товщиною 1 мм. Після цього зразки звільняли від оправки і розтягували на розривній машині FPZ-10, фіксуючи зусилля в момент руйнування.

Когезивну міцність визначали за відношенням зусилля в момент руйнування до площі напиленого покриття. Розрахунок напружень визначали за методикою, розробленою для біметалевих кілець (діаметром 60 мм, висотою 20 мм, товщиною 4 мм) з повздовжнім розрізом [9], у яких відношення радіусів центральної лінії до радіальної товщини кільця не менше 10. На зовнішню поверхню кілець наносили

ЕДП товщиною 1 мм. Для визначення напружень враховували модулі пружності сталевого кільця-підкладки і напиленого шару, який становить 70 МПа [7]. Розходження крайок визначали за використання штангенциркуля ШЦ-I-125-0,05, ГОСТ 166-89.

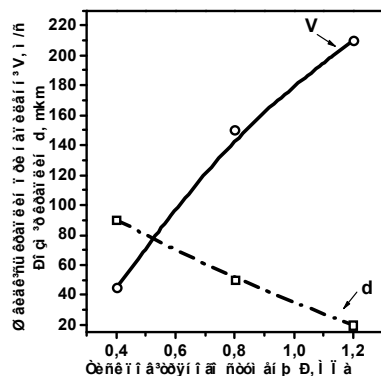


Рис. 3 – Зміна швидкості краплини та діаметру від тиску повітряного струменю:
V – швидкість краплин;
d – діаметр краплин

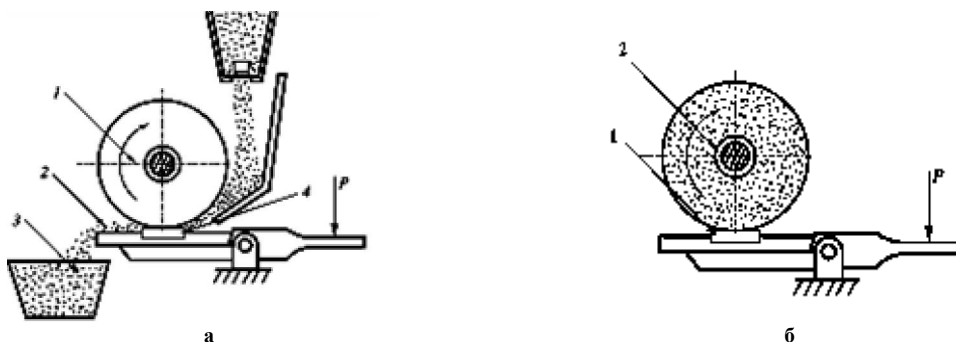


Рис. 4 – Принципова схема установок для дослідження абразивного зношування:
а – незакріпленими абразивом;
1 – гумовий диск; 2 – пісок;
3 – сміть для збирання абразиву; 4 – зразок;
б – жорстко закріпленим абразивом;
1 – зразок; 2 – абразивний круг

Абразивне зношування за тертя не жорстко закріпленими абразивними частками проводили відповідно до стандартизованої методики ГОСТ 23.208-79, схема установки показана на (рис. 4). Кварцовий пісок просушували (його вологість не перевищувала 0,16 %), а гумовий диск (табл. 1) заправляли шліфувальною шкіркою типу 2 (ГОСТ 6456-75) зернистістю № 8П (ГОСТ 3647-71), закріпленою на зразку-держаку у вигляді плоскої сталеві пластины. У зону контакту гумового круга і зразка за допомогою дозувального пристрою постійно подавали абразив.

Таблиця 1

Умови зношування

Розміри зразків, мм	30 × 40 × 6,
Діаметр гумового диска, мм	48 ... 50
Ширина гумового диска, мм	15 ± 0,1

Режим тертя: навантаження $P = 2,4$ Н, швидкість обертання диска – 25 м/хв, абразив – фракціонований (розмір частинок 200...1000 μm) та просушений пісок. Для порівняльних досліджень використовували абразивний диск із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7К15 діаметром 150 мм та шириною 8 мм (рис. 4, б).

Зернистість електрокорунду становила 250 ... 315 μm (25А, 25Н), лінійна швидкість тертя – 100 м/хв, навантаження в зоні лінійного контакту – 1,5 кг. Знос оцінювали за втратою маси зразків з точністю до $2 \cdot 10^{-4}$ г електронній аналітичній вазі марки KERN ABJ 220 4М.

Результати досліджень

Розрахунки швидкості повітряного струменю показали, що зростання тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює підвищення швидкості повітряного потоку у 2 рази від 300 до 600 м/с (рис. 1). При цьому швидкість диспергованих повітряним струменем краплин при розпиленні електродних порошкових дротів зростає від 60 – 90 м/с до 160 - 220 м/с (рис. 3), а їх розмір зменшується (рис. 4). Зменшення часу польоту диспергованих краплин від дуги до напилюваної поверхні забезпечує вищу їх температуру при вдарянні об напилювану поверхню. Підвищення тиску повітряного струменю також зменшує кут розширення металоповітряного струменю (рис. 5) із 30° до 15°.

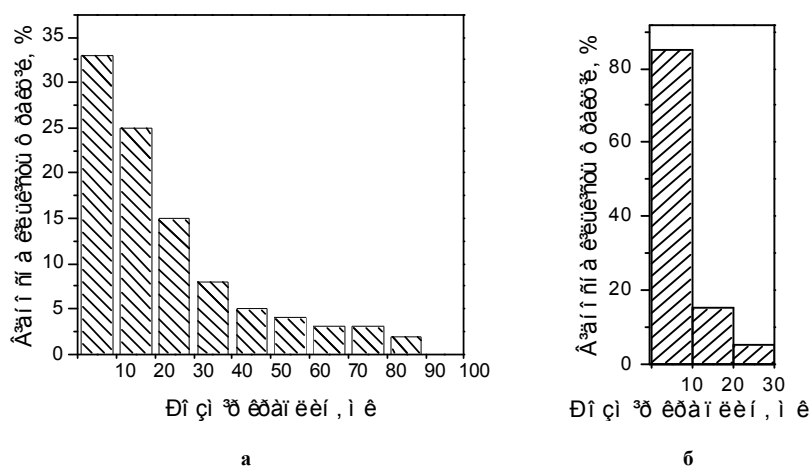


Рис. 4 – Фракційний розподіл краплин із ПД Х6Р3ІО3Мg2.а - P=0,6МПа б- P=1,2 МПа

Збільшення тиску повітряного струменю змінює умови евакуації краплин із торців електродних дротів (рис. 6). Зона плавлення дроту суттєво зростає, зменшується густина струму на торцях дроту. Це зменшує температуру розплаву (температура розплаву за тиску 0,6 МПа становить 2000 ... 2200 °С (рис. 6, а, в)) але збільшує час знаходження розплаву між торцями дроту. Це дозволяє повніше розчинити тугоплавкі шихтові матеріали у розплаві сталевій оболонки та сприяє інтенсивнішому диспергуванню розплаву з електродних дротів(рис. 6 б,г), що забезпечує зменшення розміру краплин з яких формується покриття.

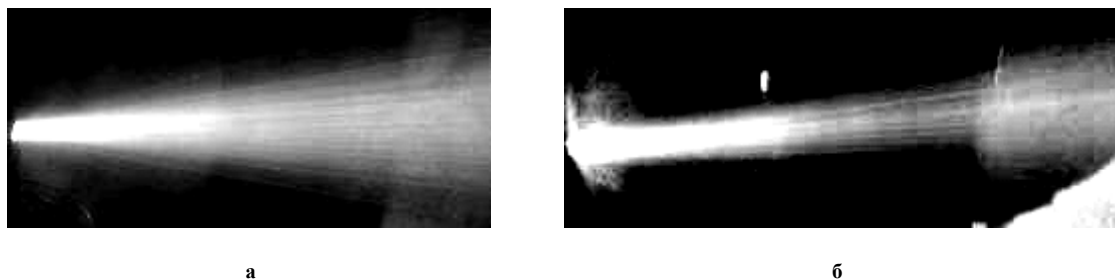
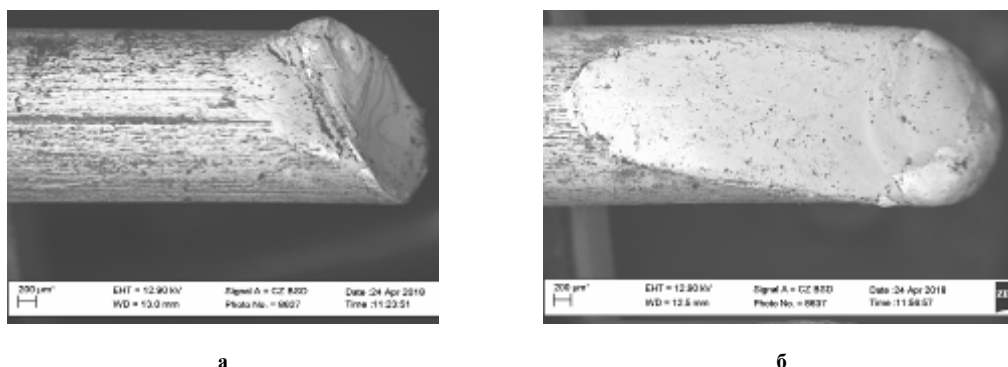
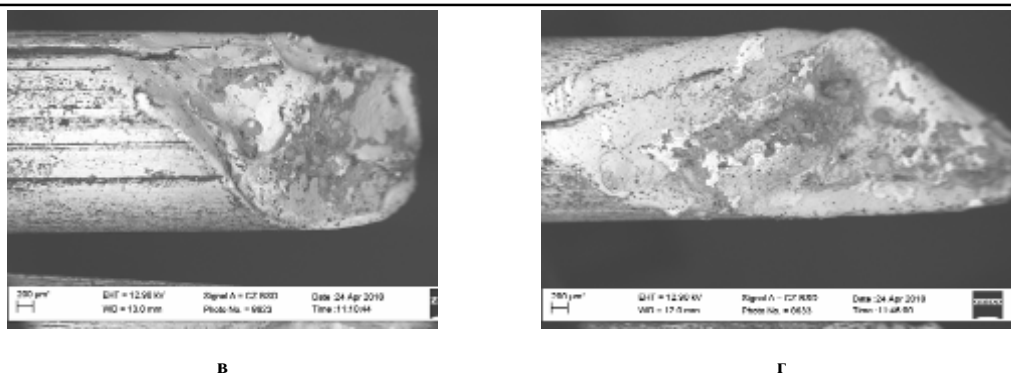


Рис. 5 – Вплив тиску повітряного струменю на кут розширення металоповітряного потоку:
а – 0,6 МПа;
б – 1,2 МПа



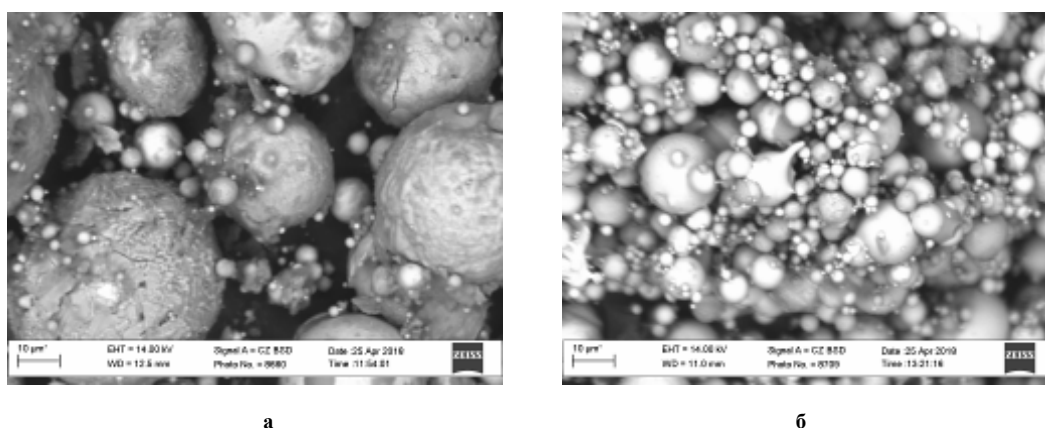


в

г

Рис. 6 – Торці дротів після наплення:
 а – У8, 0,6 МПа; б – У8, 1,2 МПа;
 в – ПД Х18Р3С2, 0,6 МПа; г – ПД Х18Р3С2, 1,2 МПа

Так за тиску повітря 0,6 МПа формуються краплини розміром від 30 до 100 мкм, (рис. 7, а), а за тиску повітря 1,2 МПа – 10 ... 30 мкм і менше (рис. 7, б) Металографічними дослідженнями підтверджено результати фракційного розподілу краплин (рис. 4) отриманих при наплення за тиску 1,2 МПа (рис. 7, б).



а

б

Рис. 7 – Розмір та форма краплин отриманих із ПД Х18Р3С2
 залежно від тиску повітряного струменю:
 а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

На поверхні диспергованих краплин формуються оксидні плівки різного хімічного складу. Зменшення розмірів краплин, забезпечує зростання площі їх контактної взаємодії з повітряним середовищем і як наслідок часткове або повне їх окиснення (рис. 7, б), що збільшує кількість оксидів і формується покриття композиційної структури (рис. 8). За тиску розпилення 0,6 МПа кількість оксидної фази у структурі покриття із дроту У8 становить 7 мас.%, а за тиску – 1,2 МПа вміст оксидів зростає у 1,7 рази та становить 12 мас.%. Як правило оксидна фаза розташовується між ламелями покриття (рис. 8), хоча в деяких випадках формується оксиди в ламелях (рис. 8б) та ламелями із повністю окиснених краплин. У покриттях із ПД Х18Р3С2 та 70Х18Р3 утворюється суттєво менше оксидних фаз (рис. 8). Із збільшенням тиску повітряного струменю кількість кисню у покриттях (рис. 8, б, г) незначно зменшується (табл. 2).

Таблиця 2

**Вплив тиску повітряного струменю
на кількість кисню у покриттях**

Хімічний склад порошкових дротів	Тиск повітряного струменю, МПа	
	0,6	1,2
	Вміст кисню у покритті, % мас / % ат	
У8	7/17,5	12/29
70Х18Р3	4,4/11,3	4/10
Х18Р3С2	4,3/10,3	4/10

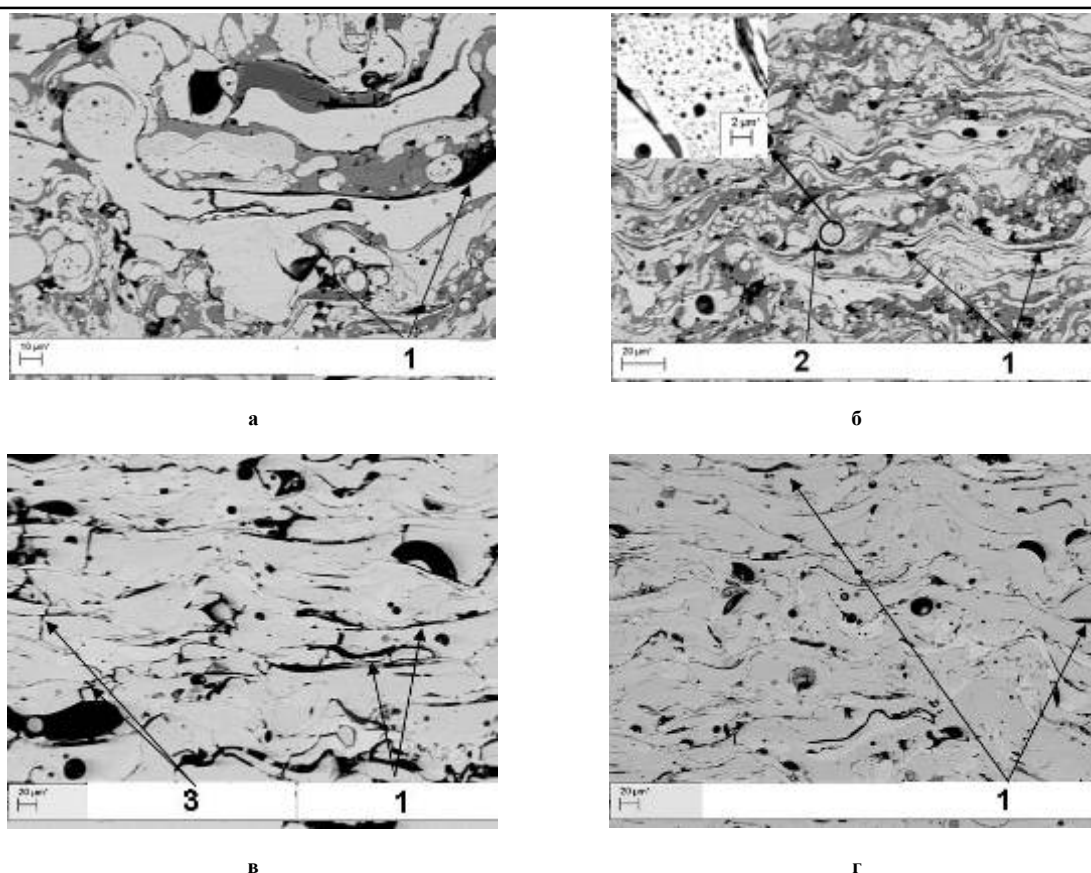


Рис. 8 – Структура покриттів напиленого за різного тиску повітряного струменю:
 а – У8; 0,6 МПа; б – У8; 1,2 МПа;
 в – Х18Р3С2; 0,6 МПа; г – Х18Р3С2; 1,2 МПа
 1 – оксиди між ламелями; 2 – оксиди в ламелях;
 3 – мікротріщини

Аналіз одержаних експериментальних даних показує, що максимальний вміст оксидів у покритті спостерігається при додаванні у шихту ферофосфору, ферохрому та феротитану (рис. 9) і при цьому у покритті формуються переважно оксиди із Ті, Сг та Fe, або їх суміші.

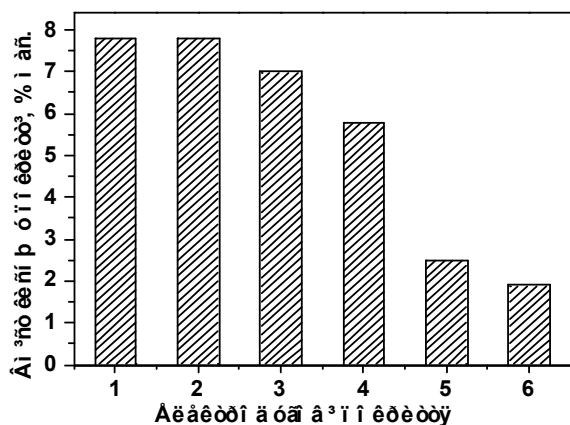


Рис. 9 – Вплив компонентів шихти порошкових дротів на вміст кисню у покриттях з ПД:
 1 – 140Х14; 2 – 140Х14ФФ; 3 – 140Х14Н2ТЮ;
 4 – 140Х16Р3Т2Н2; 5 – 140Х16Р3; 6 – Х6Р3Ю3Мg2

Мікротвердість покриттів із ПД70Х18Р3 та ПДХ18Р3С2 зростає від 850 до 1050 НВ (рис. 10, б, г). Особливо сильно зростає мікротвердість покриттів із ПД Х6Р3Ю3Мg2. Так із збільшенням тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа мікротвердість зростає від 600 до 900 НВ. Це зумовлено формуванням у структурі покриття оксидів алюмінію, мікротвердість яких становить 200НВ.

Додаток у шихту ПД таких елементів як В, Аl та Мg суттєво зменшує вміст оксидів у покритті, причому змінюється і їх хімічний склад, переважно утворюються оксиди Мg або Аl за рахунок алюмотермічного відновлення інших оксидів до металу.

Товщина міжламелярних оксидних плівок у покритті за тиску розпилення 1,2 МПа становить 1...3 мкм (рис. 8, б, г) в той же час товщина оксидних плівок за тиску 0,6 МПа може досягати 20 мкм. (рис. 8, а, в). Мікротвердість оксидних включень заліза – магнетиту, вюстититу та гематиту в покритті напиленого з нелегованого сталюого дроту знаходиться в межах 700 - 800 НВ. Це забезпечує мікротвердість покриття із нелегованого дроту У8 на рівні 200...300 НВ за тиску 0,6 МПа (рис. 10, а). Напилення цього ж покриття за тиску 1,2 МПа сприяє зменшенню розміру ламелей та оксидів, а об'ємний вміст їх зростає, що забезпечує підвищення мікротвердості до 320 ... 450 НВ.

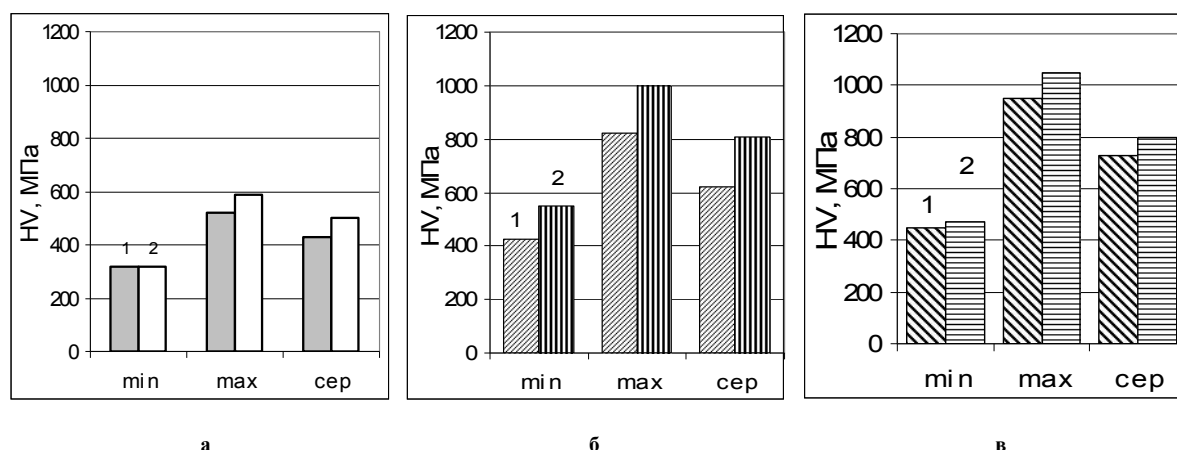


Рис. 10 – Вплив тиску повітряного струменю на мікротвердість покриттів:
 а – У8; б – X18P3C2;
 в – 70X18P3;
 1 – 0,6 МПа; 2 – 1,2 МПа

З'ясовано, що тиск повітряного струменю в значній мірі впливає на поруватість покриття. На прикладі покриття з ПДХ18P3C2 показано, що із підвищенням тиску повітряного струменю від 0,6 МПа до 1,2 МПа зменшується не тільки загальна поруватість від 8,0 до 2,0 %, а також розміри пор від 30 до 3 мкм (табл. 2). Із підвищенням тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа, когезивна міцність покриття напиленого з ПДХ18P3C2 та ПД70X18P3 зростає в 1,3 ... 2 рази. Це зумовлено міцнішим зв'язком між ламелями та формування тонких (0,5 ... 5 мкм) оксидних плівок великої довжини, як армуючої складової покриття за тиску 1,2 МПа (рис. 8, в, г).

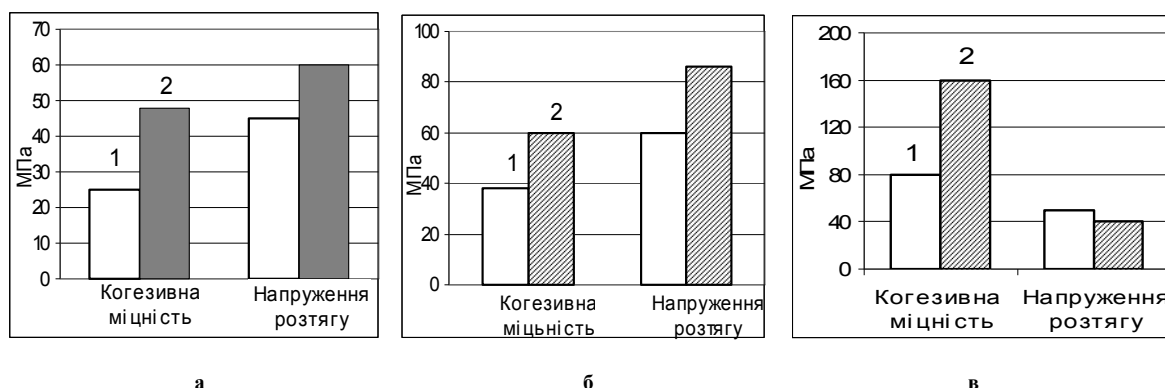


Рис. 11 – Вплив тиску повітря на когезивну міцність та напруження розтягу покриттів з ПД:
 а – 70X18P3; б – X18P3C2;
 в – X6P3Ю3Mg2;
 1 – 0,6 МПа; 2 – 1,2 МПа

Крім цього у структурі покриттів зникають мікротріщини (рис. 8, в), які характерні для покриттів напиленних за тиску 0,6 МПа. Однак при цьому зростають залишкові напруження розтягу (рис. 11, а, б). В процесі кристалізації та охолодження краплин на холодній деталі відбувається зменшення їх розмірів і як наслідок формування залишкових напружень розтягу. Релаксація цих напружень відбувається за двома механізмами (рис. 11):

- за першим – у гомогенних твердих покриттях без пластичних складових релаксація напружень відбувається шляхом утворення сітки мікротріщин (рис. 8), що є характерним для покриттів із ПДХ18P3C2 та ПД70X18P3 (рис. 11, а, б). За напилення покриттів підвищеним тиском когезивна міцність покриттів зростає (рис. 11, а, б) і мікротріщини не утворюються і релаксація напружень не відбувається.

- за другим – у гетерогенних твердих покриттях (у покритті є тверді та м'які пластичні ламелі) релаксація напружень відбувається пластичною деформацією пластичних ламелей покриття. У цьому випадку одночасно зростає когезивна міцність і зменшуються залишкові напруження розтягу у покриттях (рис. 11, в).

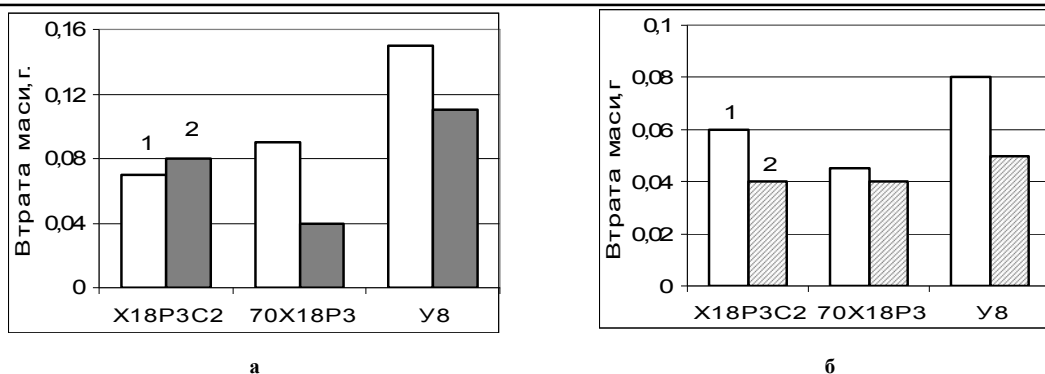


Рис. 12 – Зносостійкість покриттів із ПД:
а – жорстко закріплені абразив;
б – нежорстко закріплені абразив;
1 – 0,6 МПа; 2 – 1,2 МПа

Випробовування на абразивну зносостійкість показали, що за підвищення тиску повітряного струменю суттєво зростає зносостійкість покриттів із порошкових дротів ПДХ18Р3С2, ПД70Х18Р3 так і з суцільного дроту У8 за випробувань як закріпленим (рис. 12, а) так і незакріпленим абразивом (рис. 12, б). Опір зношуванню покриттів залежить від величини когезивної міцності, рівня напружень розтягу та структури покриттів, а саме наявності чи відсутності мікротріщин.

Висновки

1. Встановлено, що збільшення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа забезпечує зростання швидкості повітряного струменю від 300 до 600 м/с, а швидкість диспергованих краплин від 120 до 220 м/с.

2. Підвищення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює зменшення товщини ламелей покриття, формування більшої кількості оксидної фази у покритті, при цьому зростає твердість, зносостійкість, когезивна міцність. Залежно від складу шихти порошкових дротів рівень колових залишкових напружень першого роду у покритті може зростати або зменшуватись.

Література

1. Wielage B. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnytskyi, Pokhmurskii V. // *Surface and coating technology* 2013, №220, 27–35.
2. Pokhmurskyi V. I. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / Pokhmurskyi V. I., Student M.M., Pokhmurska H.V., Student O.Z, Hvozdecky V.M., Stupnytskyi T.R. // *Journal of Thermal Spray Technology*, – 2013, – vol:22.
3. Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings / M.M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet's'kyi, M.Ya. Holovchuk, M.S. Romaniv // *Materials Science*. – 2009. – 45, N 4. – P. 481-489.
4. High-temperature corrosion of electric-arc coatings sprayed from powder core wires based on the Fe–Cr–B–Al system / M. Student, Yu. Dzioba, V. Hvozdet's'kyi, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund // *Materials Science*. – 2008. – 44, 5. – P. 693-699.
5. 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 / Stupnytskyi, T.R., Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyi, V.M // *Materials Science* // September 2016, Volume 52, pp 165–172.
6. The influence of size and speed of drops on the structure and properties of electric-ARC sprayed coatings / Pokhmurs'ka, H., Student, M., Hvozdet'skyi, V., Stupnytskyi, T., Posuvailo, V // *Proceedings of the International Thermal Spray Conference* 2017.
7. Баргенов С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, Ленинград отд.-ние. – 1952. – 215 с., ил.
8. Методичні вказівки до індивідуальних занять та виконання індивідуальної роботи «Розрахунок сопла Лавалю» з курсів «Спецрозділи теплофізики» та "Розширювальні і компресорні турбомашини для газової та нафтової промисловості" / Укладач С. М. Ванєєв. – Суми : Вид-во СумДУ. – 2009. – 22с.
9. Бабичев М. А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 132 с.

Надійшла в редакцію 26.09.2018

Student M.M., Hvozdet'skyi V.M., Dzhoba Y.V. **Effect of high pressure air jet on the properties of electric arc coatings.**

Electro-arc metallization is technologically the easiest and cheapest method among gas-thermal spraying methods. Powder wires specially developed for spraying have substantially expanded the scope of application of the method of electro-arc metallization. New restorative and protective coatings with high performance characteristics of various functional purpose are sprayed from the developed powder wires. The influence of the air jet pressure on the melting conditions and the structure of the coatings deposited by the method of electric arc spraying was determined. The impact of the cutting pressure on the angle of atomization is determined. The higher droplet temperature during the formation of the coatings is achieved by reducing the angle of sputtering.

The air flow velocity increases 2 times from 300 to 600 m / s when the air jet pressure increases from 0.6 to 1.2 MPa. increase. Therefore, the rate of dispersed droplets increases from 60 - 90 m / s to 160 - 220 m / s, and the size decreases when spraying electrode wires with an air jet. Dispersed droplets of a smaller size are more easily captured by a high-speed air jet. They hit the surface more deformed when struck. This reduces the porosity of the coatings and increases the number of pieces of microwaving lamellae.

In the process of crystallization and cooling of droplets in the cold part, their dimensions are reduced. Reducing the size of droplets contributes to the formation of residual strain tension. The tensile stress in the coating for the value of 0.7 cohesive strength leads to the formation of microcracks.

Key words: powder wire, lamella coatings, oxide films, abrasive wear resistance.

References

1. Wielage B. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnytskyi, Pokhmurskii V. Surface and coating technology 2013, №220, 27–35.
2. Pokhmurskyi V. I. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures. Pokhmurskyi V. I., Student M.M., Pokhmurska H.V., Student O.Z., Hvozdecky V.M., Stupnytskyi T.R. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, vol:22.
3. Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings. M.M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet's'kyi, M.Ya. Holovchuk, M.S. Romaniv. Materials Science. 2009. 45, N 4. P. 481-489.
4. High-temperature corrosion of electric-arc coatings sprayed from powder core wires based on the Fe–Cr–B–Al system. M. Student, Yu. Dzioba, V. Hvozdet's'kyi, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund. Materials Science. 2008. 44, 5. P. 693-699.
5. 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. Stupnyts'kyi, T.R., Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyi, V.M. Materials Science. September 2016, Volume 52, pp 165–172.
6. The influence of size and speed of drops on the structure and properties of electric-ARC sprayed coatings. Pokhmurs'ka, H., Student, M., Hvozdet'skyi, V., Stupnytskyi, T., Posuvailo, V. Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2017.
7. Bartenev S.S., Fedko Yu.P., Grigorov A.I. Detonatsionnyie pokryitiya v mashinnostroenii. L. Mashinostroenie, Leningrad otd.-nie. 1952. 215 s., il.
8. Metodichni vказivki do individualnih zanyat ta vikonannya individualnoyi roboti «Rozrahunok sopla Lavalya» z kursiv «Spetsrozdilli teplofiziki» ta "Rozshiryvalni i kompresorni turbomashini dlya gazovoYi ta naftovoYi promislivosti". Ukladach S. M. VanEEv. Sumi. Vid-vo SumDU. 2009. 22s.
9. Babichev M. A. Metodyi opredeleniya vnutrennih napryazheniy v detalyah mashin. M. Izd-vo AN SCCR, 1955. 132 s.