

ВПЛИВ РОЗМІРУ КРАПЛИНИ ТА ШВИДКОСТІ ПОТОКУ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИВІВ

В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ¹, Я. Я. СІРАК¹, Х. Р. ЗАДОРЖНА¹,
Я. М. ДЕМ'ЯНЧУК²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Івано-Франківський національно-технічний університет нафти і газу

Показано, що зі збільшенням тиску металоповітряного струменя від 0,6 до 1,2 МПа зростає його швидкість від 300 до 600 м/с. Визначено, що зі збільшення швидкості потоку частинок зменшується час транспортування крапель від дуги до підкладки і вони вдаряються об підготовлену поверхню за вищих температур. Встановлено, що зі зростанням тиску повітря зменшується розмір крапель та окислів між ламелями, а також поліпшуються механічні характеристики.

Ключові слова: *електродуговий покрив, сопло Лавалю, ламелі, окисні плівки.*

Серед газотермічних методів отримання покривів електродугова металізація (ЕДМ) є технологічно найпростішим і найдешевшим методом. Використання останнім часом електродних матеріалів у вигляді розроблених 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 покривів (ЕДП) характерною є висока поруватість 7...10%, високий рівень залишкових напружень розтягу 60...70 МПа, низька когезія 80...90 МПа та адгезія 8...10 МПа (порівняно із покриттями, нанесеними іншими газотермічними методами). Останнім часом у світовій практиці намагаються підвищити фізико-механічні характеристики ЕДП. Для цього в низці робіт стиснуте повітря замінюють на суміш горючих газів із киснем [3, 4]. Такий метод, внаслідок підвищення швидкості розплавлених краплин, які формують покриття, дозволяє суттєво поліпшити їхні механічні характеристики та зменшити поруватість, однак при цьому суттєво ускладнюється конструкція обладнання, зростають енергетичні затрати та собівартість нанесення ЕДП. Нижче досліджено вплив зростання швидкості польоту розплавлених краплин під час їх напилення за підвищення тиску повітря, яке подається в систему розпилювання металізатора від 0,6 до 1,2 МПа, на механічні характеристики ЕДП.

Методики експериментів. Електродугові покриття завтовшки 1 мм наносили металізатором ГТ-1 виробництва Фізико-механічного інституту НАН України. Для напилення покривів використали електродні матеріали: дріт суцільного перерізу Св08 та порошкові дроти марки 140Х14; 140Х14ФФ; 140Х14Н2ТЮ; 140Х16РЗТ2Н2; 140Х16РЗ; Х6РЗЮ3Мg2. Покриття напилували за таких режимів: напруга на дузі $U = 32$ В, струм $I = 120$ А, тиск повітря $P = 0,6; 0,9$ та $1,2$ МПа за витрати повітря $1,3$ м³/мін, віддалі від дуги до напилуваної поверхні у всіх випадках 120 мм. Перед напиленням зразки піддавали абразивоструминній обробці корундом. Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3 за навантаження 200 г.

Для отримання надзвукової швидкості повітряного струменя (число Маха 2) використовували сопло Лавалю з вертикальним розміщенням двох повітряних каналів у соплі з критичним діаметром отворів 2,2 mm (рис. 1), довжина надзвукової частини 15 mm.

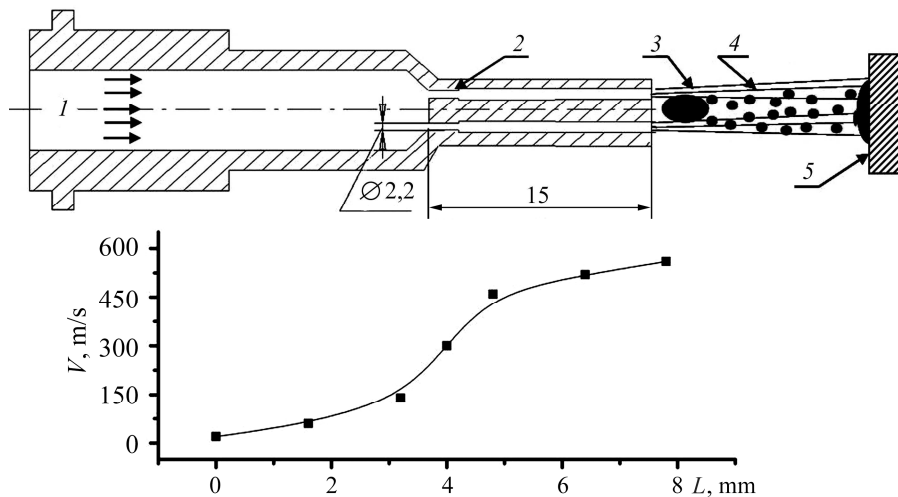


Рис. 1. Схема сопла для отримання надзвукового потоку: 1 – повітряний потік; 2 – критичний переріз сопла; 3 – розплав з електродних матеріалів; 4 – металоповітряний потік; 5 – сталеві підкладка з напиленим покриттям; V – швидкість струменя; L – довжина сопла.

Fig. 1. Scheme the nozzle for supersonic flow: 1 – air flow; 2 – critical section of the nozzle; 3 – melt of electrode materials; 4 – metal-air flow; 5 – steel substrate with deposited coating; V – flow rate; L – length of the nozzle.

Розраховували параметри сопла Лавалю так: площа поперечного перерізу $f_i = G/(\rho_i \cdot w_i)$; діаметр $d_i = ((4/\pi) \cdot f_i)^{0,5}$; довжина дозвукової частини сопла $l_1 = (d_i - d_{kp}) / (2 \cdot \text{tg}(\alpha_2/2))$, надзвукової $l_2 = (d_i - d_{kp}) / (2 \cdot \text{tg}(\alpha_1/2))$ [5]. Віддаль від зрізу сопла до дуги 10 mm. Швидкість повітряного потоку визначали за формулою $w_i = [2k/(k-1) \cdot R(T_0^* - T_i)]^{1/2}$ [5], де w – швидкість повітряного потоку у соплі, $k = C_p/C_v$ – показник адиабати, R – газова стала повітря, T_0 та T_i – температура повітряного потоку у дозвуковій та надзвуковій частинах сопла. Швидкість диспергованих повітряним струменем краплин визначали експериментально з використанням двох обертових дисків.

Рис. 2. Схема зразка для нанесення покриття з метою визначення його когезивної міцності: 1 – поверхня для наплення покриття; 2 – штифт; 3 – захисні фланці; 4 – пружина; 5 – гайка.

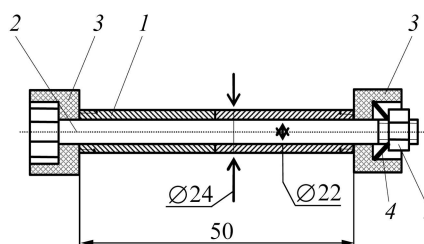


Fig. 2. Scheme for coating samples to determine the value of its cohesive strength: 1 – sample surface for spraying coatings; 2 – pin; 3 – protecting flanger; 4 – spring; 5 – nut.

Щоб визначити температуру поверхні під час наплення за тиску 0,6 та 1,2 МПа, покриття наносили нерухомим металізатором впродовж 30 s на пластину товщиною 5 mm, на зворотній стороні якої фіксували термопару в отворі на глибині 4 mm. Покриття напилювали з електродного дроту масою 300 g, спостерігали

зміну їхньої температури на поверхні деталі в плямі наплення за параболічним законом. За тиску повітря 0,6 МПа фіксували максимальну температуру 450°C, а за тиску 1,2 МПа – 600°C. Когезивну міцність покриттів визначали на трубчатих зразках (рис. 2), які складаються із двох половинок загальною довжиною 100 мм. Половинки зразків з'єднували між собою на оправці – болт і гайка. На поверхню зразків наносили покриття товщиною 1 мм. Після цього зразки знімали з оправки і розтягували на розривній машині FPZ-10, фіксуючи зусилля в момент руйнування. Когезивну міцність визначали за відомою формулою $\sigma = P/S$, де P – зафіксоване навантаження в момент руйнування; S – площа наплененого покриття.

Розрахунок напружень визначали за методикою, розробленою для біметалевих кілець з діаметром 60 мм, висотою 20 мм, товщиною 4 мм та поздовжнім розрізом, у яких відношення радіусів центральної лінії до радіальної товщини кільця не менше 10. На зовнішню поверхню кілець наносили ЕДП товщиною 1 мм. Щоб визначити напруження, враховували модулі пружності сталевого кільця-підкладки і наплененого шару – 70 МПа [6]. Розходження крайок заміряли штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05.

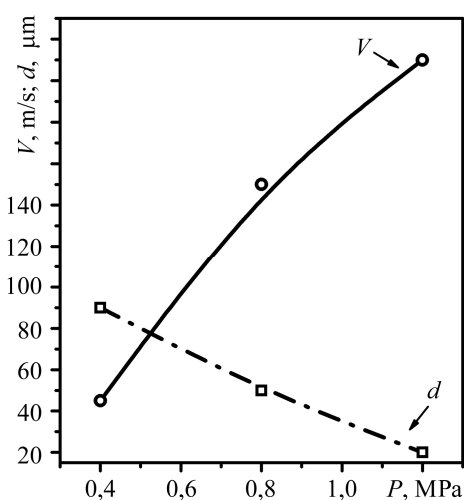


Рис. 3. Зміна швидкості V та діаметра d краплин залежно від тиску повітряного струменя P .

Fig. 3. Change of drops rate V and diameter d depending on the pressure of air flow P .

ром від 30 до 100 μm (рис. 4a), а за тиску 1,2 МПа – 30...10 μm і менше (рис. 4b).

Металографічними дослідженнями підтверджено результати фракційного розподілу краплин (рис. 4b), отриманих при напленні за тиску 1,2 МПа (рис. 5a).

На поверхні диспергованих краплин формуються оксидні плівки різного складу. Зменшення розмірів краплин забезпечує зростання площі їх контактної взаємодії з повітряним середовищем і, як наслідок, часткове або повне окиснення (рис. 5b), що збільшує кількість оксидів зі зменшенням їх розмірів і формуванням композиційної структури покриття (рис. 6).

За тиску розпилення 0,6 МПа кількість оксидної фази у структурі покриття із ПД 140X14N2ТЮ становить 15...20%, а за тиску 1,2 МПа вміст оксидів зростає у 1,3–1,5 рази та становить 20...30%. Зазвичай оксидна фаза розташовується між ламелями покриття (рис. 6a), хоча в деяких випадках із повністю окиснених краплин формуються ламелі (рис. 6b).

Результати та їх обговорення.

Розрахунки швидкості повітряного струменя за наведеною вище формулою показали, що зростання його тиску від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює підвищення швидкості повітряного потоку у 2 рази від 300 до 600 м/с (див. рис. 1). При цьому швидкість диспергованих повітряним струменем краплин за розпилення електродних порошкових дрітків зростає від 60...90 м/с до 160...220 м/с (рис. 3), а їх розмір зменшується. Зменшення часу польоту диспергованих краплин від дуги до напильованої поверхні забезпечує вищу їх температуру за удару об поверхню.

Підвищення тиску повітряного струменя від 0,6 до 1,2 МПа сприяє інтенсивнішому диспергуванню розплаву з електродних дрітків, що забезпечує зменшення розміру краплин, з яких формується покриття. За тиску повітря 0,6 МПа формуються краплини розміром

Рис. 4. Фракційний розподіл краплин з ПД Х6Р3Ю3Мg2 за $P = 0,6$ (a) та 1,2 МПа (b): n – відносна кількість фракцій, h – розмір краплин.

Fig. 4. Fractional distribution of drops with powder wire (PW) Cr6B3Al3Mg2 at $P = 0.6$ (a) and 1.2 МПа (b): n – the relative number of fractions, h – drops size.

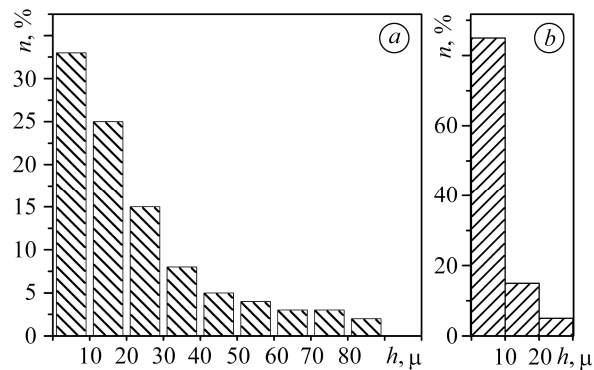


Рис. 5. Дисперговані краплини з ПД Х6Р3Ю3Мg2: a – загальний вигляд краплин з поверхні; b – поперечний шліф напилених у снігову мішень краплин: повне та часткове окиснення краплини з поверхні.

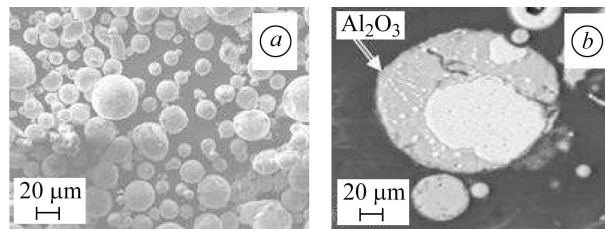


Fig. 5. The atomized drops with PW Cr6B3Al3Mg2: a – general view of drops from the surface; b – grinding microsection of drops sprayed in snow target: full and partial oxidation of drops from the surface.

Рис. 6. Розміщення оксидних плівок у структурі покриття з ПД 140Х14Н2ТЮ за $P = 0,6$ (a) та 1,2 МПа (b).

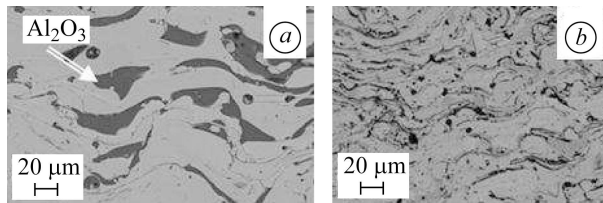
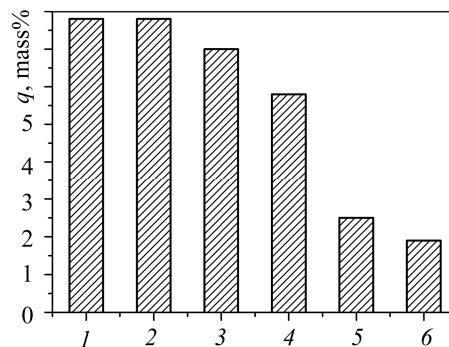


Fig. 6. Placing of oxide films in the coating structure with PW 140Cr14Ni2TiAl at $P = 0.6$ (a) and 1.2 МПа (b).

Аналіз одержаних експериментальних результатів показує, що максимальний вміст оксидів у покритві спостерігається за додавання у шихту ферофосфору, ферохрому та феротитану (рис. 7) і при цьому у покритві формуються переважно оксиди із Тi, Cr та Fe, або їх суміші. За додавання у шихту ПД таких елементів, як В, Al та Mg вміст оксидів у покритві суттєво зменшується, причому змінюється і їхній хімічний склад (переважно утворюються оксиди Mg або Al внаслідок відновлення інших оксидів до металу).

Рис. 7. Вплив компонентів шихти порошкових дротів на вміст кисню (q) у покритвах з ПД: 1 – 140Х14; 2 – 140Х14ФФ; 3 – 140Х14Н2ТЮ; 4 – 140Х16Р3Т2Н2; 5 – 140Х16Р3; 6 – Х6Р3Ю3Мg2.

Fig. 7. Effect of charge components of cored wires on oxygen content (q) in the coatings with PW: 1 – 140Cr14; 2 – 140Cr14PP; 3 – 140Cr14Ni2TiAl; 4 – 140Cr16B3Ti2Ni2; 5 – 140Cr16B3; 6 – Cr6B3Al3Mg2.



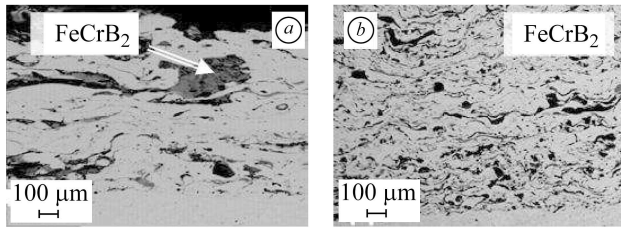


Рис. 8. Мікроструктура покриттів з ПД Х6Р3Ю3Мg2:
а – $P = 0,6$ МПа; б – 1,2.

Fig. 8. Microstructure of coatings with PW Cr6B3Al3Mg2:
а – $P = 0.6$ МПа; б – 1.2.

Товщина міжламельних оксидних плівок у покритті за тиску розпилення 1,2 МПа становить 1...3 μm (рис. 6b) тоді як за тиску 0,6 МПа може досягати 20 μm (рис. 6a). Мікротвердість оксидних включень заліза (магнетиту, вюститу та гематиту) в покритті, напиленого з нелегованого сталевого дроту, знаходиться в межах 700...800 НV. Це забезпечує мікротвердість покриття із нелегованого дроту Св08 на рівні 200...300 НV за тиску 0,6 МПа. Напилення цього ж покриття за тиску 1,2 МПа сприяє зменшенню розміру ламелей та оксидів, а їх об'ємний вміст зростає, що забезпечує підвищення мікротвердості до 320...450 НV. У покриттях, напилених з порошкового дроту Х6Р3Ю3Мg2 за тиску 0,6 МПа та підвищеного тиску 1,2 МПа, мікротвердість зростає від 600...650 до 850...900 НV через підвищений вміст оксидів алюмінію (мікротвердість Al_2O_3 становить 2000 НV) та рівномірніший розподіл боридів FeCrB_2 у структурі покриття (рис. 8).

Вплив тиску повітряного струменя на поруватість та розміри пор у покритті з ПД 140Х14Н2ТЮ

Тиск повітряного струменя, МПа	Відкрита об'ємна поруватість, %	Середня товщина пори, μm
0,4	8,0	30
0,6	4,4	10
0,8	3,0	5
1,2	2,0	3

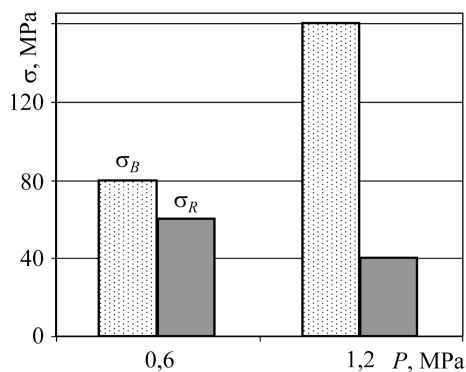


Рис. 9. Когезивна міцність σ_B та залишкові напруження розтягу σ_R покриття з ПД Х6Р3Ю3Мg2.

Fig. 9. Cohesive strength σ_B and residual tensile stresses σ_R of the coating with PW Cr6B3Al3Mg2.

З'ясовано, що тиск повітряного струменя суттєво впливає на поруватість покриття.

На прикладі покриття з ПД 140Х14Н2ТЮ показано, що з підвищенням тиску повітряного струменя від 0,6 до 1,2 МПа зменшуються: поруватість від 8 до 2%; геометричні розміри пор від 30 до 3 μm (див. таблицю). Внаслідок міцнішого зв'язку між ламелями та формування тонких оксидних плівок великої довжини як армувальної складової когезивна міцність покриття, напиленого з ПД Х6Р3Ю3Мg2, за тиску 1,2 МПа зростає у 2 рази, а рівень залишкових напружень розтягу першого роду зменшується (рис. 9).

ВИСНОВКИ

Встановлено, що зі збільшенням тиску повітряного струменя від 0,6 до 1,2 МПа зростає його швидкість від 300 до 600 м/с, а швидкість диспергованих краплин від 120 до 220 м/с. Підвищення тиску повітряного струменя від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює зменшення товщини ламелей покриття, формування більшої кількості оксидної фази у ньому, при цьому зростає твердість, когезивна міцність та знижується рівень колових залишкових напружень першого роду.

РЕЗЮМЕ. Показано, что с увеличением давления металловоздушной струи от 0,6 до 1,2 МПа увеличивается ее скорость от 300 до 600 м/с. Увеличение скорости потока частиц уменьшает время транспортировки капель от дуги к подложке и они ударяются о подготовленную поверхность при более высоких температурах. Определено, что с увеличением давления воздуха уменьшается размер капель и окислов между ламелями, а также улучшаются механические характеристики.

SUMMARY. The increase of metal-air flow pressure from 0.6 to 1.2 MPa provides the growth of its rate from 300 to 600 m/s. The increase of particles flow rate reduces the time of drops carriage from the arc to the substrate and they bump against the prepared surface at higher temperatures. The increase of air pressure provides the reduction of drops and oxides size between Lemele as well as improves the mechanical characteristics.

1. *Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures* / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyi, V. Pokhmurskii // *Surface and Coating Technology*. – 2013. – № 220. – P. 27–35.
2. *Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures* / V. I. Pokhmurskyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurska, O. Z. Student, V. M. Hvozdecky, T. R. Stupnytskyi // *J. of Thermal Spray Technology*. – 2013. – **22**, № 5. – P. 808–819.
3. *Вплив високотемпературної корозії на газоабразивну тривкість електродугових покриттів* / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький, М. Я. Головчук, М. С. Романів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – **45**, № 4. – С. 19–26.
(*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**, № 4. – P. 481–489.)
4. *Високотемпературна корозія електродугових покриттів з порошкових дротів на базі системи Fe–Cr–B–Al* / М. Студент, Ю. Дзьоба, В. Гвоздецький, Г. Похмурська, Б. Вілаге, Т. Грунд // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2008. – **44**, № 5. – С. 93–97.
(*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. *Методичні вказівки до індивідуальних занять та виконання індивідуальної роботи “Розрахунок сопла Лаваля” з курсів “Спецрозділи теплофізики” та “Розширювальні і компресорні турбомашини для газової та нафтової промисловості”* / Укладач С. М. Ванеєв. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 22 с.
6. *Бабичев М. А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин*. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 132 с.

Одержано 16.08.2017