

## Машинобудування і зварювальне виробництво

8. Мялін М.І., Сагалевич В.М. Вплив термодформаційного циклу на технологічну міцність при наплавленні бронзи на сірий чавун/ М.І. Мялін, В.М. Сагалевич, В.Н.Туригін та ін. // Зварювальне виробництво. - 1988. - №3. - С.10 - 11.
9. Фінкель В.М. Фізика руйнування. - М.: Металургія, 1980. - 376 с.
10. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - М.: Світ, 1980. - 306с.
11. Абрамович Г.П. Прикладна газова динаміка - М.: Наука, 1979. - 824с.

Volenko I.V.

### THE PROCESS OF STRENGTHENING SUPPORT ROLLS BY THE FUSION METHOD

*In nature, all processes involuntarily flow towards the energy minimum – current flows from higher to lower potential, gas moves from higher to lower pressure, heat spreads from higher to lower temperature, elements diffuse from higher to lower concentration, the arc deviates towards lower magnetic field.*

*According to the Steinbeck minimum principle, the arc tends to burn at minimum voltage. According to the quantum theory of the magnetic field, any system, with the help of radiation or any other method, always enters a state with a low energy level or the ground state, with its own energy value equal to  $E_0$ . [10], which confirms the law minimum energy*

**Keywords:** *high speed surfacing with low heat input, energy-saving process, welding stresses, microstructure reduction, cracking resistance, supporting roll.*

*Стаття надійшла 18.11.2023 р.*

УДК 621.179.92

[doi.org/10.31498/2522-9990262023294100](https://doi.org/10.31498/2522-9990262023294100)

Захарова І.В.

### АНАЛІЗ СКЛАДУ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ЗАДЛЯ ОТРИМАННЯ ПІДВИЩЕНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛІЗАЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПУЛЬСУЮЧОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ

*Основним напрямом при розробці складів шихти порошкових дротів в даний час є застосування порошків карбідів, нітридів, а також порошків, що використовуються для газополум'яного, плазмового та детонаційного наплення. Очікуваний ефект тут завжди досягається через активне окислення і розпад деяких компонентів шихти. При цьому залишається доволі висока вартість матеріалу та відносно низька міцність зчеплення покриття з основою. В представленій роботі розглянуто рішення задачі ресурсозбереження за рахунок створених порошкових дротів, що складаються з маловуглецевої оболонки і наповнювача з недефіцитних, широко поширених порошків металів і феросплавів та пульсуючої подачі розпилювального потоку повітря, що забезпечують отримання високозносостійких покриттів з підвищеною міцністю зчеплення, а також твердих, міцних оксидів в нанесеному покритті.*

*Дана робота представляє дослідження складів порошкових дротів, проведено аналіз отриманих покриттів і рекомендовано складу порошків які дозволять отримати високу якість нанесеного покриття з застосуванням пульсуючого потоку повітря.*

**Ключові слова:** порошковий дріт, дугове напилення, зносостійкість, нанесення покриттів, мікротвердість.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Численні деталі машин, елементів техніки та споруд відновлюють методами газотермічного нанесення покриттів [1]. З поміж цих методів електродугове напилення покриттів із використанням спеціальних порошкових дротів технологічно найпростіше і не потребує дороговартісного обладнання. В останні роки в Україні представлені результати з розроблення електродугових покриттів із використанням порошкових дротів у сталевій оболонці для відновлення та зміцнення різноманітних деталей і конструкцій. Ряд розробок мають ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів) та Інститут електрозварювання ім. О.Є. Патона НАН України. Спеціальні порошкові дроти, дозволяють розширити область застосування електродугової металізації [3]. Використання для електродугового напилення електродних матеріалів у вигляді спеціальних порошкових дротів уможливило розширення сфери застосування методу та одержання відновних і захисних покриттів різного функціонального призначення з високими експлуатаційними характеристиками. Проте електродуговим покриттям характерна висока поруватість, високий рівень залишкових напружень розтягу, низька когезія та адгезія (порівняно з іншими газотермічними покриттями) [1] – [8]. На відміну від дротів суцільного перерізу покриття з порошкових дротів мають високу мікрогетерогенність за хімічними елементами, яка суттєво впливає на зносостійкість покриттів.

**Мета дослідження.** Метою роботи є аналіз декількох варіантів порошкових дротів з різним хімічним складом запропонованих для електродугового напилення з застосуванням пульсуючого потоком повітря задля отримання підвищених показників зносостійкості.

**Основний матеріал дослідження.** В процесах відновлення деталей точного обладнання в Україні та ряді європейських країн для отримання зносостійких покриттів на поверхні зносу деталі широко використовують дроти та порошки з вуглецевих легованих сталей, сплавів на основі нікелю та кобальту та тверді сплави.

Широке застосування отримали самофлюсні сплави *Ni-Cr-Si-Bi Co-Cr-B*, таблиця 1 і 2 [9]. Особливо високу зносостійкість мають композиційні покриття *WC – Co*, в яких вміст *Co* становить 8...20 %, *WC – Ni(Ni ≈ 8%)Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ni–Cr (15%Ni–Cr)*.

Таблиця 1 – Зносостійкі сплави вітчизняного виробництва, які самофлюсуються

Сплав	Хімічний склад, %					
	C	Si	Fe	Ni	Cr	B
ПГ-ХН8ОСР	1,21	2,64	2,27	решта	14,96	0,97
ПГ-ХН8ОСР2	1,03	2,32	2,59	-//-	16,61	2,23
ПГ-ХН8ОСР3	0,97	2,76	5,42	-//-	16,39	2,51
ПГ-ХН8ОСР4	1,07	2,89	5,46	-//-	18,92	2,93
СНГН-1	0,44	4,49	1,71	-//-	16,38	3,78
СК-1	0,33	4,68	0,2	-//-	19,68	5,02
Сормайт сколковий	3,5	0,48273	решта	3,38	30,02	-
Сормайт гранульований	2,97	0,43298	-//-	5,28	28,2	-
ББХ-6-2	4,2	0,942	-//-	-	39,6	1,43
Суміші						
ПС-1	50			ПГ-ХН8ОСР2		
	+50			Сормайт гранульований		
ПС-2	50			СНГН-1		
	+50			Сормайт сколковий		
ПС-3	50			ПГ-ХН8ОСР2		
	+50			ББХ-6-2		

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Однак для отримання цих покриттів застосовується лише плазмовий та детонаційний методи [10]. Високу зносостійкість мають плазмові покриття 80% WC– 20 % Mo, які мають HV 1700-1800 та міцність зчеплення зі сталлю 30 МПа. В якості третьових ущільнюючих покриттів прийнято застосовувати композиції Ni – 15-20 % графіту, а для отримання покриттів з низьким коефіцієнтом тертя в основному пропонується використовувати Ni–CaF<sub>2</sub>, NiO–CaF<sub>2</sub> таблиця 3.

Високу зносостійкість, щільність і міцність зчеплення з підкладкою мають покриття на основі інтерметалідів композицій Ni-Al і Ni-Ti.

Запропоновано такі сплави, %:

1. Ni - 80-98, Al - 2-20.
2. Ni - 90-95, Al - 4-6.
3. Ni - 40-70, Ti - 60-30.
4. Ni - 54-56, Ti - 44-46.

З цих сплавів отримують дріт для дугової та плазмової металізації [9]

Таблиця 2 – Механічні властивості твердих сплавів на основі кобальту

№ сплаву	Твердість		σ <sub>B</sub> кгс/мм <sup>2</sup>	σ <sub>02</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	δ, %	E, кгс/мм <sup>2</sup>	Д(стиск), кгс/мм <sup>2</sup>
	HRC	HV <sub>20</sub>					
8	10-35	300-350	72,6	46,3	8	3,0106	24,9
9	48-55(H)	-	-	-	-	-	-
10	54(II)	-	-	-	-	-	-
11	43-46(II)	425-460	63,3	37,1	-	3,5106	174,5
12	62-75(II)	-	-	-	-	-	-

Таблиця 3 – Властивості плазмових композиційних покриттів за даними роботи [10]

Склад порошку, %	Мікротвердість	Коефіцієнт тертя
15Ni-80NiC2	950	0,58
25NiCr-75Cr3C2	600-2200	0,60
20Co-80WC	-	0,58
78NiO-22CaF2	-	0,67
75Ni-25CaF2	-	0,33
44Ni-51VoS2	-	0,12

Високу зносостійкість має покриття на основі Ni-Cr-Fe-B-S з додаванням частинок WC розміром 0,1-10 мкм (10-20%) і нікелю. Як найбільш економічний порошок для плазмової металізації пропонується використовувати шихту з частинок чавуну розміром до 15 мкм, покритих зв'язкою з частинками молібдену і бору розміром до 0,1 мкм. Зміст Mo в шихті 20%, В<sub>2</sub>%. Замість чистих порошоків молібдену та бору оптимальним є застосовування порошоків феросплавів FeMo с 55-75 % Mo и FeB с 10-30 % B.

В якості зносостійких покриттів також ефективно використовуються оксиди і суміші тугоплавких карбідів (W-Ti-C, Ta-Ne-C) та W-Ti-Ta-Nb-C що наведено в таблиці 4 [9].

Таблиця 4 – Теплофізичні характеристики порошкових матеріалів (оксидів) для плазмового напилення

Матеріал	$B_i$			
	Ar	$N_2$	$H_2$	$F_o$
$Al_2O_3$	0,043	0,139	1,20	0,98
BeO	0,016	0,053	0,459	1,72
$Cr_2O_3$	0,087	0,200	2,520	0,61
HfO 0,129	0,428	3,710	0,59	-
MgO 0,045	0,150	1,30	0,93	-
NiO 0,060	0,200	1,730	0,89	-
$SiO_2$ 0,039	0,129	1,114	1,42	-
$TiO_2$ 0,63	0,082	0,273	2,36	-
$Y_2O_3$	0,180	0,600	5,20	0,42
$ZrO_2$	0,54	0,112	0,315	3,25
MgO $Al_2O_3$	0,052	0,173	1,50	0,79
$Zn_2 SiO_2$	0,087	0,290	2,52	0,74

Теплофізичні критерії  $B_i$  та Фур'є ( $F_o$ ) наведені для  $dr = 60$  мкм, при  $T = 0,5$  Тпл,  $N_2 = 9$  кВтм<sup>2</sup>град<sup>-1</sup>;  $H_2 = 9$  кВтм<sup>2</sup>град<sup>-1</sup>.

Окисли алюмінію, магнію, заліза та ін. металів широко використовують як тепло - і жаростійких покриттів, багато з яких знаходять застосування і як зносостійкі покриття.

Проведений аналіз показує, що для отримання високозносостійких покриттів застосовують порошки металів алюмінію, титану, хрому і молібдену. Нікелеві та молібденові порошки використовуються для нанесення підшару, що забезпечує підвищену міцність зчеплення покриття з основою [11].

Також застосовуються комбіновані порошки, що складаються з карбідів металів, оксидів та чистих металів. Нанесення таких покриттів визначається переважно методом плазмового, газо полум'яного та детонаційного напилення [12]. Діапазон зносостійких покриттів, одержуваних методом електродугової металізації, обмежений можливістю виробництва легованих дротів малого діаметра (2-3 мм).

В даний час, наприклад, у Японії, при дугової металізації з використанням двох електродів з різнорідних металів отримують покриття у вигляді псевдосплаву, що складається із суміші двох матеріалів. Характер зносостійкості різних металізаційних покриттів наведено на рисунку 1. Значення зносу отримані при стиранні зразка наждачним папером протягом 1 хв. при швидкості ковзання 8 м/с та тиску 1,66 МПа. Покриття з низьковуглецевої та корозійностійкої сталі типу 18-8 з молібденом мають досить низьку зносостійкість [9-12]. Найбільш високо зносостійким є сплав колмоною № 6 (містить: 73,75% Ni; 13,50% Cr; 3,0% B; 4,25Si; 4,75Fe; 0,75C).

Проведений аналіз дозволив встановити, що для отримання зносостійких покриттів газотермічним напиленням в даний час широко використовуються порошки з легованих сталей і сплавів на основі нікелю, кобальту, молібдену та ін. Для отримання зносостійких покриттів застосовують карбіди кремнію, титану та вольфраму. Додатково знижує окиснюваність рідкого розплавленого металу при металізації використання пульсуючого розпилювального потоку повітря для нанесення покриття [11].

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Також особливу увагу заслуговує застосування порошку карбиду вольфраму в складі наповнювача дротів для металізації. Частки вольфраму мають дуже високу твердість і тугоплавкість і тому практично не окислюються і переходять до складу покриття, однак він має порівняно велику вартість. Матеріали, що забезпечують низький коефіцієнт тертя металевих пар-композиції це нікель-графіт та керамічні матеріали також мають заслуговано поширене використання, але ж дивлячись на високу температуру їх правлення, як правило, застосовують для їх нанесення плазмове або детонаційне напилення.

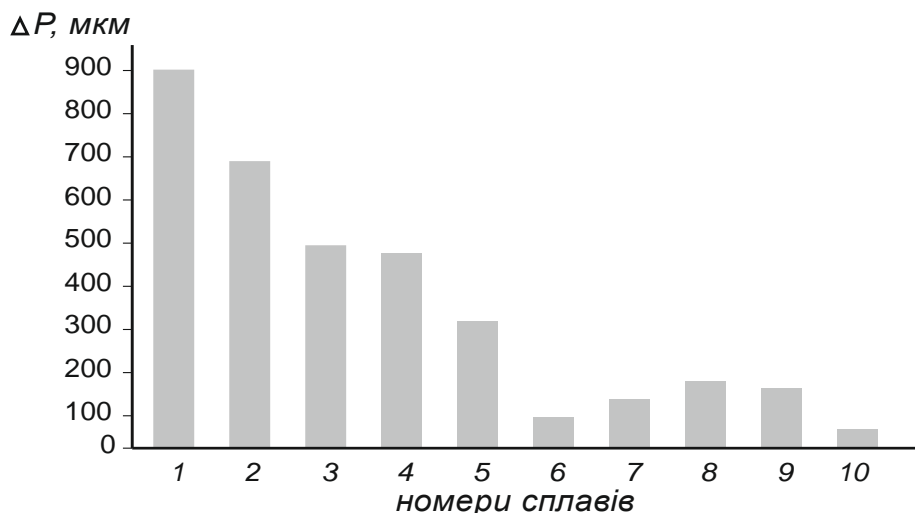


Рисунок 1 – Зношування металізаційних покриттів за даними

- 1- низьковуглецева сталь; 2 - корозинностійка сталь типу 18-8 із вмістом молібдену; 3 - хромомолібденова сталь; 4 стелліт № 66; 5 - стелліт №33; 6 - стелліт №11; 7 - сплав на хромонікелевій основі; 8 - колмоною № 4; 9 - колмоною № 5; 10 - колмоною № 6

Однак, необхідно також враховувати економічні міркування (дефіцитність, важке виробництво, скорочення запасів деяких матеріалів та їхнє здороження). Дроти малого діаметру, виготовлені з високолегованих сталей, і покриття з них значно дешеві, але ж поступаються технологічними характеристиками, та особливо зносостійкістю. І тому на ряди виробничих ділянок набули поширення псевдосплави при електродуговому напиленні дротом різного складу [12].

У практиці електродугового напилення сучасних зносостійких покриттів останнім часом, все більш знаходять широке застосування порошкові дроти, до складу сердечника яких вводять порошки та матеріали, призначені для плазмового та детонаційного напилення [11], або як легуючі використовують порошки високо вартісних металів. Це призводить до підвищення загальної вартості порошкових дротів при порівняно низькій ефективності використовуваних матеріалів за рахунок окислення повітряним струменем і як слід малого коефіцієнту переходу елементів в покриття.

З метою зниження зазначених недоліків, здійснюється отримання зносостійких покриттів за рахунок легування розплавлюваної оболонки з низьковуглецевої сталі 08КП недефіцитними феросплавами, які вводяться до матриці дроту частинами карбиду металів і твердими оксидами задля отримання в оксидній фазі покриття комплексів оксидів (шпинелів) з підвищеною хімічною активністю та твердістю. При цьому з огляду на сучасні тенденції отримання зносостійких покриттів пропонується оптимізувати використання вартісних порошоків металів або феросплавів, що містять молібден, вольфрам, нікель, ванадій, ніобій та ін.

### ВИСНОВКИ

1. При дуговій металізації на оптимальних стабільних параметрах хром, який входить до складу дроту, практично не окислюється, ступінь окислення хрому не перевищує 0,5%.

2. У дротах з високовуглецевих (до 1% С) сталях, хром (до 4%) сприяє значному підвищенню твердості при загартуванні (в результаті утворення високодисперсних спеціальних карбідів), після якого покриття набувають високої зносостійкості та ріжучих властивостей.

3. При легуванні дротів з низьковуглецевих (0,10-0,15% С) сталей хромом (5-10%), підвищуються міцнісні властивості та корозійна стійкість покриттів у деяких хімічних активних середовищах.

Таким чином, використання хромистих сталей для виготовлення дротів для електродугової металізації вирішують завдання, поставленим у цій роботі - забезпечення отримання більш високозносостійкого напиленого шару. Рекомендовано до використання склад порошкових дротів, які забезпечують отримання в покритті 1-2% С, 4-10% Cr.

### Список використаних джерел

1. Сухенко Ю.Г., Литвиненко О. А., Сухенко В. Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підручник. – Київ: НУХТ, 2010. – 430 с.

2. Коробов Ю. С., Луканин В. Л., Прядко А. С. Преимущество активированной дуговой металлизации. Сварщик. 2002. № 2. С. 16 – 17.

3. Електродугові відновні та захисні покриття: монографія / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. – Львів : Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2005. – 190 с.

4. Вплив Карбону в порошкових дротах системи Fe-Cr-C-Al на відносну зносостійкість покриттів за умов граничного мащення / М. Студент, О. Калахан, Т. Ступницький, В. Гвоздецький, О. Шабатура, В. Кульматицький // Вісник ЛНАУ : агроінж. дослідження. Львів : Львів. нац. агроуніверситет, 2013. № 17. С. 261 – 268.

5. Вплив діаметра порошкового дроту на мікрогетерогенність покриття / М. М. Студент, О. С. Калахан, М. Я. Головчук, Х. Р. Задорожна, Б. В. Занько // Вісник ЛНАУ : агроінж. дослідження. Львів: Львів. нац. агроуніверситет, 2017. № 21. С. 61 – 68.

6. Абразивна зносостійкість плазмоелектролітних шарів на основі корунду синтезованих на алюмінієвих сплавах та електродугових покриттях / М. Студент, О. Калахан, В. Посувайло, В. Гвоздецький, Я. Сірак, Б. Гнатів // Вісник ЛНАУ : агроінж. дослідження. Львів: Львів. нац. агроуніверситет, 2017. № 21. С. 69 – 74.

7. Калахан О.С., Левонюк В.Р., Занько Б.В., Гнатів Б.Б. Відновлення деталей машин енергетичного призначення електродуговою металізацією порошковими дротами. Актуальні питання енергоефективності гірничометалургійного виробництва: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих вчених. Зб. наук. праць. Кривий Ріг: 2018. С. 162.

8. Гнатів Б. Б. Вплив діаметра порошкового дроту та мікрогетерогенності покриття та його абразивну стійкість. Перші наукові кроки 2018: матеріали 32 XII Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих наук. Зб. наук. праць. – Кам'янець – Подільський : 2018. С. 120.

9. Борисов Ю. С. Плазменные порошковые покрытия /Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. Киев :Техніка, 1986. 222

10. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, М.А. Харламов, Е.И. Ардатовская //Справочник. Киев. Накова думка1987. 543с.

11.Роянов В. А. Энерго и ресурсосбережение при электродуговом напылении покрытий: монография/ В. А.Роянов, И.В. Захарова // Мариуполь: ПГТУ, 2018. – 143 с.

12. Пахмурский В.Н. Основы формирования защитных и восстановительных покрытий электродуговым напылением порошковыми проволоками / В.Н.Пахмурский, М.М.Студент, В.С.Пук // Физико-химическая механика материалов. 1986. №6. С.11-16

Zaharova I.V.

### ANALYSIS OF THE COMPOSITION OF CORED WIRES FOR OBTAINING INCREASED WEAR-RESISTANT PROPERTIES OF METALLIZATION COATING USING A PULSATING SPRAY AIR FLOW

*Currently, the main direction in the development of powder wire charge compositions is the use of powders of carbides, nitrides, as well as powders used for gas flame, plasma and detonation sputtering. The expected effect here is always achieved due to active oxidation and decay of some components of the charge. At the same time, the cost of the material remains quite high and the adhesion strength of the coating to the base is relatively low.*

*In the presented work, the solution to the problem of resource conservation due to the created powdered wires, consisting of a low-carbon sheath and a filler of non-scarce, widespread powders of metals and ferroalloys and a pulsating supply of atomized air flow, which ensure the production of highly wear-resistant coatings with increased adhesion strength, as well as hard, strong oxides in the applied coating.*

*This work presents a study of the compositions of powder-coated wires, an analysis of the obtained coatings was carried out, and the composition of powders was recommended, which will allow obtaining a high-quality applied coating with the use of a pulsating air flow.*

**Keywords:** flux-cored wire, arc spraying, wear resistance, coating, microhardness.

*Стаття надійшла 16.11.2023 р.*

УДК 621.791.753.042

[doi.org/10.31498/2522-9990262023294131](https://doi.org/10.31498/2522-9990262023294131)

Щетинін С.В.

### ПІДВИЩЕННЯ ТРИЩИНІЙКОСТІ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ НАПЛАВЛЕННІ НА НИЗЬКІЙ ЕНЕРГІЇ

*Природа зварювання та наплавлення електромагнітна, так як природа міжатомних зв'язків електромагнітна. Міжатомні зв'язки обумовлені пінч-ефектом мікрострумів, обертаючихся навколо ядра електронів, діють на міжелектронному рівні, що дорівнює діаметру електронів  $10^{-19}$  м і значно підвищує міжатомні зв'язки. Згідно закону збереження енергії, при електродуговому наплавленні дуга передає основному металу теплову та кінетичну енергію плазмових потоків, під дією яких і термодіформаційного циклу виникають мікроспостворення кристалічної решітки, міронапруги, щільність дислокацій та зварювальні напруги.*

*При зростанні швидкості наплавлення збільшується швидкість кристалізації, здрібнюється мікроструктура, зменшується енергія, тепловкладення, що забезпечує зменшення мікроспостворень кристалічної решітки, міронапруг, зварювальних напруг, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості. Розрахунково-експериментальним способом встановлено, що, згідно закону збереження енергії та принципу суперпозиції, з підвищенням*