

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-92-101

УДК 533.924:620.18

Володимир Лебедєв¹, Сергій Лой², Володимир Спіхтаренко³

¹доктор технічних наук, головний конструктор
Державне підприємство «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро інституту електрозварювання
ім. С. О. Пато́на НАН України» (Київ, Україна)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²доцент кафедри зварювання
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова (Херсон, Україна)

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

³доцент кафедри зварювання
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова (Херсон, Україна)

E-mail: vladimir.kherson11@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9791>

МОЖЛИВОСТІ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПРИ ЗМІЦНЕННІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ВУЗЛІВ І ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТА ІНШОЇ ТЕХНІКИ

З метою виявлення способу підвищення міцності зчеплення напиленого шару з металом поверхні проведено пошук матеріалів, які можна застосувати як порошок для ефективного відновлення та зміцнення деталей. Визначено основний компонент – самофлюсуючий сплав, та введення в його склад компоненти в вигляді борного шлаку. Запропоновано методику знаходження оптимального розрахунку кількості введення шлаку та застосованих параметрів плазмового процесу напилення для отримання максимального ефекту – максимальних значень характеристик зчеплення.

Ключові слова: плазмова напилення, компоненти порошку, параметри процесу, оптимальний розрахунок,
Рис.: 5. Табл.: 4. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Відновлення і зміцнення великої кількості вузлів і деталей різних машин та механізмів є актуальною проблемою, оскільки дозволяє вирішити ряд завдань експлуатаційного характеру. Основними з цих завдань є продовження терміну служби вузлів та деталей. А також скорочення реальних витрат на їх придбання та резервування (постачальні операції). Кожна галузь, що спирається на застосування певних машин та механізмів, має досить обмежену номенклатуру вузлів та деталей для відновлення та зміцнення. Парк машин та механізмів для сільськогосподарського виробництва, на нашу думку, найбільш широко представлений у різноманітті машин та механізмів. Це і загальнопромислові автомобілі та трактори, а також великий типаж специфічних машин. Так, наприклад, обладнання для оранки, культивації та інших механізмів обробки землі під посів. Є широка номенклатура машин та механізмів для збирання врожаю. Вимагають відновлення лемеша плугів, лапи культиваторів, ножі комбайнів та різноманітних косарок.

Постановка проблеми Можна відновлювати і зміцнювати вузли двигунів внутрішнього згоряння та інших. Очевидно, що є широкий фронт для організації робіт з відновлення та зміцнення найширшого ряду вузлів і деталей машин та механізмів сільськогосподарського виробництва. Є багато способів і технологій, які можуть бути застосовані для широкого використання в роботах з відновлення та зміцнення вузлів та деталей. Насамперед це практично всі способи електродугового наплавлення, які представлені в технічній літературі, наприклад [1]. Цей спосіб має значне поширення внаслідок своєї відносно простоти й універсальності як за типом сталей, що наплавляються, так і застосовуваних електродних матеріалів і умов застосування. До обмежень при реалізації цього типу технології слід зазначити досить вузький вибір діапазон режимів, що позначається на товщинах, що наплавляються, а отже, у багатьох випадках і на коробленні наплавлених деталей. Через нерівномірність нанесення наплавленого шару потрібна додаткова механічна обробка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Набуває дедалі більшого поширення нанесення покриттів, що відновлюють і зміцнюють, з використанням низькотемпературної плазми (дифузна металізація) [2; 3]. Цей спосіб отримання покриттів частково замінює, а частково доповнює спосіб електродугового наплавлення.

Поширення технології плазмового напилення сприяють нижченаведені її особливості:

- можливість наносити покриття на деталі складної форми та на вироби великих розмірів;

- отримати рівномірне покриття на значній поверхні та на її обмежених ділянках;

- дозволяє наносити шари в кілька міліметрів і при цьому практично уникнути деформації тонколистового виробу;

- висока продуктивність процесу;

- можливість автоматизації процесу напилення.

До недоліків плазмового напилення можна віднести:

- у деяких випадках недостатній ступінь адгезії напиленого шару до основної деталі;

- одержання пухкої структури з включеннями.

Виключити зазначені недоліки можна декількома шляхами, серед яких підбір найбільш ефективних режимів, вибір матеріалів порошку та його додаткових компонентів, ретельна підготовка напилюваної поверхні, вибір транспортуючого газу, цілеспрямоване вдосконалення конструкції плазмотрона та установки загалом та ін.

Метою роботи є дослідження деяких матеріалів, у тому числі самофлюсуючих сплавів, шлаків, що використовуються як напилюваний порошок, здатних ефективно впливати на міцнісні характеристики напиленого шару, а також вивчення їхніх можливостей для використання в практичних роботах з відновлення та зміцнення вузлів та деталей машин та механізмів сільськогосподарського та інших виробництв.

Виклад основного матеріалу. Основою для напилюваного шару був обраний порошок, що складається з бор і кремній хромо-нікелевих сплавів типу ПГ-10Н-01 [4]. Підставою для вибору було те, що цей порошок є самофлюсуючим, так як утворювані при плавленні боросилікати пов'язують оксиди заліза, нікелю, хрому і виводять їх на поверхні у вигляді склоподібних шлаків. Такий процес забезпечує оплавлення напиленого покриття на повітрі. Плазмове напилення, яке вивчається, можна охарактеризувати як процес з одночасним оплавленням.

Сплави, що самофлюсуються, і сплав ПГ-10Н-01 зокрема, відрізняються пластичністю при плавленні і гарною змочуваністю. Ці характеристики забезпечують відсутність стікання покриття при оплавленні та дають можливість отримувати напилення покриття товщиною 2-3 мм.

Покриття з самофлюсуючих сплавів набувають дедалі більшого поширення, зокрема при відновленні та зміцненні деталей двигунів автотракторної техніки. Такі покриття часто при відновленні мають більший ресурс, ніж нові деталі. Однак слід зазначити і деякі обмеження в застосуванні сплавів, що самофлюсуються, як порошку для плазмового напилення. Так, покриття на основі ПГ-10Н-01 і подібних до нього мають недостатню міцність зчеплення в місцях де деталі відчувають великі деформації зсуву внаслідок того, що міцність покриття не має рівної міцності з основним металом. У таких випадках достатню для експлуатації міцність зазвичай отримують унаслідок додаткової технологічної операції, при якій на поверхні напилюваної деталі створюють шорсткість. Тому міцність зчеплення покриття досягається головним чином за рахунок наявної на поверхні шорсткості. Необхідну шорсткість можна отримати декількома способами: нарізанням рваного різьблення, дробоструминною обробкою та іншими методами. Така підготовка поверхні подовжує технологічний цикл відновлення зношеної поверхні на 30-40 %. Збільшується трудомісткість відновлення чи зміцнення деталі та вартість робіт.

Для досягнення цілей роботи насамперед слід зупинитися на вирішенні таких основних завдань:

- підвищити міцність зчеплення покриття із підкладкою (поверхнею деталі);
- знизити трудомісткість і вартість робіт, в основному за рахунок виключення з технологічного циклу операції підготовки поверхні, що напилюється.

Одним з напрямків, що дозволяють вирішити вищевказані завдання, є додаткове введення до складу самофлюсуючих сплавів типу ПГ-10Н-01 та інших на основі Ni-Cr-B-Si флюсових добавок.

Вивчення впливу флюсових добавок проводилося на основі визначення міцності паяних сполук, де часто застосовуються флюси, до складу яких входять бориди, у які для підвищення активності вводять у вигляді лігатури алюміній, мідь та магній. Можна зазначити, що такі флюси істотно підвищують адгезійну міцність паяних конструкцій. На підставі цього проводилося вивчення "борного шлаку", який включає зневоднену буру і подвійний метаборат натрію і магнію ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6 \cdot \text{MgO}$) у певному співвідношенні.

Для визначення ефективності застосування пропонованої композиції порошку для напилення необхідно було провести ряд випробувань зазначеного складу, з визначення параметрів міцності та дослідивши кількісне співвідношення покриття на основі ПГ-10Н-01 із введенням до його складу борного шлаку. Найбільш показовими міцності характеристики напиленого покриття можуть бути визначені при дослідженнях на зріз.

Для цих досліджень виготовлялася партія заготовок - зразків для натурних експериментів. Зовнішній вигляд таких заготовок представлений на ескізі рис. 1.

Як матеріал зразків для напилення була обрана сталь 40Х. Напилення виконували на установці УПУ-3Д плазмотроном ПН-25. Слід зазначити, що установка була модернізована за конструкцією плазмотрона, системою подачі порошку, що напилюється, та ін. відповідно до роботи [5]. Покриття наносилося з одночасним оплавленням. Режими напилення такі:

- струм плазми, 300-400 А;
- напруга, 40-60 В;
- витрата плазмоутворюючого газу, 100-300 л/хв;
- дистанція напилення, 100-150 мм.

Для початкового визначення кількісного складу порошку використовувалися спеціально приготувані суміші з різною кількістю компонентів флюсу, які представлені в табл. 1.

Один зразок напилюється складом № 1 з циклом підготовки поверхні, що включає:

- знежирення поверхні;
- піскоструминна обробка поверхні.

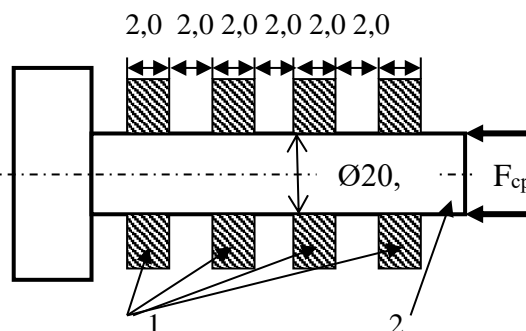


Рис. 1. Ескіз зразка для досліджень міцності покриття на зріз:

1 – напилені ділянки; 2 – підкладка

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 1

Склад зразка

№	Склад зразка	Матеріали напилювальної суміші, мас %		Міцність σ_s , МПа
		ПГ-10Н-01	Борний шлак	
1	З підготовкою поверхні	100,00	-	361,4
2	Без підготовки поверхні	99,50	0,50	311,2
3	Без підготовки поверхні	99,00	1,00	328,2
4	Без підготовки поверхні	98,50	1,50	360,4
5	Без підготовки	98,50	3,00	401,0
6	Без підготовки поверхні	98,50	5,00	350,7

Напилення покриттів інших зразків здійснювалося без попередньої підготовки поверхні.

Напилений шар проточується по зовнішній поверхні до Ø24 мм. Потім на нанесеному шарі робилися проточки до основного металу для поділу напиленого шару на окремі кільця (рис. 1) шириною 2 мм, які випробовувалися на зріз. Площа зрізу – $F = 125,6 \text{ мм}^2$. Експериментальна робота з

визначенням міцності на зріз σ_e виконувалася із застосуванням спеціальної втулки (рис. 2), яка продавлювалася до зрізування по напиленим кільцям. При цьому динамометром вимірювалося зусилля зрізу.

Визначення величини міцності на зріз проводилося з використанням виразу

$$\sigma_e = \frac{F}{S}, \tag{1}$$

З аналізу отриманих результатів (табл. 1) слід зазначити, що немає однозначної залежності між кількістю борного шлаку в порошок, що напилюється, і міцністю отриманого результату. Крім цього, як відомо [6], істотний вплив на характеристики міцності напиленого шару надають і інші параметри напилення, основні з яких струм і напруга процесу. Для наступних етапів дослідження нами обрані саме струм та напруга разом із кількісним вмістом борного шлаку.

Було проведено великий цикл дослідно-експериментальних робіт із виявлення залежностей $\sigma_e = f(p, I,)$ і $\sigma_e = f(p, U)$ докладно представлених у табл. 2 і табл. 3. Експерименти з вихідними даними та отриманими результатами, за табл. 2 виконувались при напрузі 50 В.

Таблиця 2

Результати досліджень впливів струму та вмісту шлакової компоненти на міцність напиленого шару

I, A	p, %										
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
300	257,0	265,9	274,8	283,7	292,6	301,5	310,4	319,3	328,2	337,1	346,0
310	260,2	268,8	277,4	285,9	294,5	303,1	311,7	320,3	328,8	337,4	346,0
320	263,4	271,7	279,9	288,2	296,4	304,7	313,0	321,2	329,5	337,7	346,0
330	266,6	274,5	282,5	290,4	298,4	306,3	314,2	322,2	330,1	338,1	346,0
340	269,8	277,4	285,0	292,7	300,3	307,9	315,5	323,1	330,8	338,4	346,0
350	273,0	280,3	287,6	294,9	302,2	309,5	316,8	324,1	331,4	338,7	346,0
360	276,2	283,2	290,2	297,1	304,1	311,1	318,1	325,1	332,0	339,0	346,0
370	279,4	286,1	292,7	299,4	306,0	312,7	319,4	326,0	332,0	339,3	346,0
380	282,6	288,9	295,3	301,6	308,0	314,3	320,6	327,0	333,3	339,7	346,0
390	285,5	291,8	297,8	303,9	309,9	315,9	321,9	327,9	334,0	340,0	346,0
400	289,0	294,7	300,4	306,1	311,8	317,5	323,2	328,9	334,6	340,3	346,0

З аналізу результатів, поданих у табл. 2 слід зробити кілька важливих висновків.

Передусім це зростання міцності зчеплення зі збільшенням практично в усіх досліджених діапазонах флюсової компоненти і струму плазмового процесу, проте зі збільшенням струму темп зростання міцності поступово знижується. Аналогічна картина спостерігається і зі зростанням міцності зі збільшенням флюсової компоненти. На нашу думку, однією з причин цієї закономірності може бути збільшення енергетичного впливу на вміст флюсу в порошок, що напилюється, який просто вигоряє.

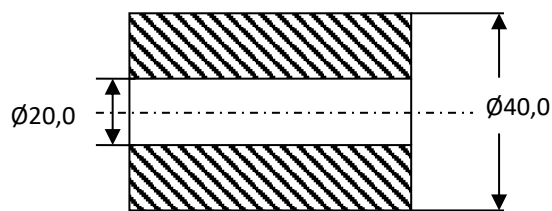


Рис. 2. Ескіз втулки для випробувань на зріз зразка

Джерело: розроблено авторами.

Вихідні дані та результати вимірювань, дані в табл. 3, виконані при постійному значенні струму процесу – 350 А.

Таблиця 3

Результати досліджень впливів напруги процесу та вмісту шлакової компоненти на міцність напиленого шару

U, В	p, %										
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
40	204,0	220,1	236,2	252,3	268,4	284,5	300,6	316,7	332,8	348,9	365,0
42	212,5	227,6	242,6	257,7	272,7	287,8	302,9	317,9	333,0	348,0	363,1
44	221,0	235,0	249,0	263,1	277,1	291,1	305,1	319,1	333,2	347,2	361,2
46	229,5	242,5	255,5	268,4	281,4	294,4	307,4	320,4	333,3	345,3	359,3
48	238,0	249,9	261,9	273,8	285,8	297,7	309,6	321,6	333,5	345,5	357,4
50	246,5	257,4	268,3	279,2	290,1	301,0	311,9	322,8	333,7	344,6	355,5
52	255,0	264,9	274,7	284,6	294,4	304,3	314,2	324,0	333,9	343,7	353,6
54	263,5	272,3	281,1	290,0	298,8	307,6	316,4	325,2	334,1	342,0	351,7
56	272,0	279,8	287,6	295,3	303,1	310,9	318,7	326,5	334,2	342,0	349,8
58	280,5	287,2	294,0	300,7	307,5	314,2	320,9	327,7	334,4	341,2	347,9
60	289,0	294,7	300,4	306,1	311,8	317,5	323,2	328,9	334,6	340,3	346,0

З аналізу табл. 3 можна зробити висновок, що тенденція зниження зростання міцності зчеплення зі збільшенням напруги процесу та змісту шихти, як і в попередньому випадку, дотримується, проте тут з'являється інша особливість – зі зростанням параметрів спостерігається падіння значень міцності зчеплення. Це також можна пояснити, зокрема, і впливом енергетичних характеристик плазми та режиму оплавлення на діючий вміст борного шлаку, який має досить низьку температуру плавлення та розкладання.

За результатами цього експериментального етапу досліджень і результатів представлених у табл. 1, 2 і 3 виконаний комплекс робіт, що дозволив відповідно до [7] здійснити математичне планування експериментів з подальшим визначення залежності $\sigma_g = f(p, I, U)$, де p – частка шлакової компоненти у складі порошку, що напилюється.

На підставі цього експериментального етапу досліджень отримано регресійне рівняння, що описує залежність $\sigma_g = f(p, I, U)$ у вигляді повного лінійного рівняння

$$\sigma_g = 293,00 + 8,00p + 16,5I + 54,5U + 18,00IU + 8,00pUI . \quad (2)$$

При цьому була виконана перевірка значущості коефіцієнтів рівняння з наступним винятком малозначущих величин. За табличними значеннями критерію Кохрена [8] визначено значущість експерименту.

Адекватність рівняння регресії було перевірено з допомогою критерію Фішера [8]. З розгляду табл. 1, 2, 3 випливає, що міцність зчеплення зовсім по-різному залежить від силових характеристик плазмового процесу і від вмісту компоненти борного шлаку в порошку, що напилюється. Для того щоб визначити максимальний ефект від цих показників, які можна прийняти як основні, необхідно визначити оптимальне (максимальне) значення залежності. Цей пошук можна здійснити, використовуючи певні методів, наприклад, виділивши найбільш дієві значення за їх ваговим впливом на шуканий якісний показник. Це досить складне оцінне завдання. У межах цієї роботи нами вбачається, що найбільш простим і дієвим буде використання методики математичного планування експериментів Бокса-Вілсона (метод крутого сходження) [9], при використанні якого в цьому випадку як параметр оптимізації прийнята міцність зчеплення покриттів з основою, що є одним із головних критеріїв, що характеризують якість напилених покриттів.

Таблиця 4

Матриця планування експериментів при пошуку оптимальності – міцності покриття

№	Крок варіювання	I, А	U, В	p, %	σ_s , МПа, М
		5,87	2,42	0,4	
1	Основний рівень	350,00	50,00	1,00	293,00
2	Експеримент 1	355,87	52,42	1,40	337,87
3	Експеримент 2	361,74	54,84	1,80	374,66
4	Експеримент 3	367,61	57,27	2,20	402,30
5	Експеримент 4	373,49	59,69	2,60	419,69
6	Експеримент 5	379,36	62,11	3,00	425,73
7	Експеримент 6	385,23	64,53	3,40	419,34
8	Експеримент 7	391,10	66,95	3,80	399,42
9	Експеримент 8	396,97	69,38	4,20	364,87
10	Експеримент 9	402,84	71,80	4,60	314,62
11	Експеримент 10	408,72	74,22	5,00	247,56

тків за методикою Бокса-Вілсона, яка представлена в табл. 4.

Використовуючи результати, подані в табл. 4, виконано графічну побудову залежності $\sigma_s = f(p, I, U)$, де видно її оптимум, який можна використовувати в практичній роботі при виборі силових режимів напилення, а також кількість борного шлаку, що вводить до складу порошку.

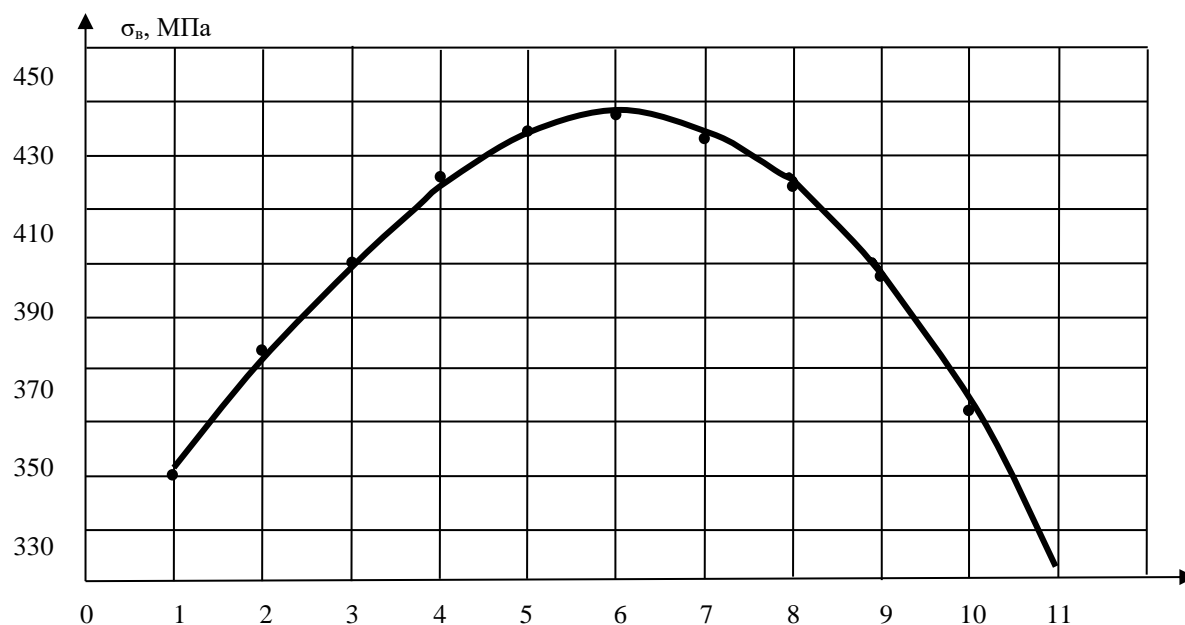


Рис. 4. Залежність міцності зчеплення від основних параметрів плазмового процесу
Джерело: розроблено авторами.

Для повного розуміння процесів при формуванні напиленого шару, зокрема на кордоні з підкладкою, було виконано дослідження цієї зони на ряді зразків з отриманням та аналізом мікроструктур. Приклади мікроструктур для порівняльних висновків представлені на фотографіях рис. 5.



а

б

Рис. 5. Структура напиленого покриття:

а – без додавання борного шлаку $\times 200$;б – із введенням до складу порошку борного шлаку $\times 200$

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження мікроструктури на рис. 5 та інших аналогічних структур показали, що при виконанні покриттів на непідготовлену поверхню підкладки зі сталі 40Х напиленням порошку ПГ-10Н-01, без введення борного шлаку з оплавленням, на непідготовлену підкладку в зоні з'єднання покриття з напилюваною поверхнею утворюється відносно рівний світлий прошарок (рис. 5, а) товщиною близько 12 мкм. На нашу думку, це результат взаємної дифузії компонентів покриття та підкладки. Покриття досить щільне, хоча є окремі мікропори.

Лінія сплавлення покриття, що містить борний шлак у кількості 3%, та основи (рис. 5, б) має складну хвилюподібну форму. Очевидно, введення в порошок, що напилюється, борного шлаку сприяє інтенсивному розчиненню підкладки в покритті. Це явище спостерігається і при інших концентраціях борного шлаку, який є поверхнево активним речовиною.

Для перевірки отриманих розрахунковим шляхом значень міцності виконувалося напилення зразків виготовлених зі сталі 40Х із запровадженням борного шлаку не більше як 2,5-3,5 %. Середній результат, отриманий при випробуванні на зріз покриття, становить 410 МПа, що в межах 5 % від розрахункового значення, що підкреслює адекватність застосування математичних методів щодо визначення оптимуму характеристик міцності.

Можна відзначити, що форма лінії взаєморозташування напилення і підкладки значною мірою визначає міцнісні характеристики напиленого шару.

За результатами досліджень можна рекомендувати процес напилення із введенням борного шлаку для відновлення цілого ряду деталей у тому числі колінчастих валів. При цьому наголошується на збільшенні міцності зчеплення з одночасним винятком спеціальної обробки поверхні деталі. Характеристики міцності зчеплення напиленого шару порошком ПГ-10Н-01 без спеціальної підготовки основи становить 280 МПа, а з введенням борного шлаку – до 425 МПа і це підвищення міцності на 35 %

Висновки. 1. Застосування покриттів із сплавів, що самофлюсуються, дозволяє отримати покриття з високою міцністю зчеплення напиленого шару з основою і високою зносо- та ерозійною стійкістю. Високі показники механічних властивостей покриттів, що самофлюсуються, забезпечує структури з дрібнодисперсними однорідно розподіленими складовими покриття.

2. Значну роль у забезпеченні міцності зчеплення плазмового покриття з підкладкою (деталлю) відіграє шлакова компонента (борний шлак), введена до складу порошку, що напилюється, який дозволяє при оптимально вибраних характеристиках процесу на 30...35 % збільшити величину міцності на зріз у порівнянні зі звичайними покриттями.

3. Застосування методів математичного планування експериментів з виявленням оптимальних параметрів з напылення з різними характеристиками: вміст шлаку у складі порошку, енергетичні характеристики процесу (струм, напруга) дозволяють визначити найбільш ефективно поєднання варіантів впливу для отримання максимально значущого результату.

Список використаних джерел

1. Рябцев И. А. Теория и практика наплавочных работ / И. А. Рябцев, И. К. Сенченков. – К. : Екотехнологія, 2013. – 400 с.
2. Pfender L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies / Pfender L. F. // Cambridge International Science Publishing. – 2003. – Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design. – Pp. 20-41.
3. Лащенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. – К. : Екотехнологія, 2003. – 64 с.
4. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В. И. Кузьмин, С. П. Вашенко, И. П. Гуляев и др. // Вестник Юргинского государственного университета. – 2015. – Вып. 2(37). – С. 45-52.
5. Лебедев В. А., Лой С. А. Модернизация плазматрона для напыления на воздухе и в контролируемой атмосфере (в вакууме) / В. А. Лебедев, С. А. Лой // Вісник Національного технічного університету “ХІІІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2019. – № 10. – С. 21-29.
6. Pavlowski L. Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / Pavlowski L., John Wiley. – 2nd ed. – Sons Ltd., 2008. – 656 p.
7. Губин С. В. Теория планирования экспериментов в энергетике : Курс лекций для высших технических учебных заведений / С. В. Губин, А. И. Яковлев. – К. : Миллениум, 2009. – 158 с.
8. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Химмельблау Д. – М. : Издательство “Мир” 1973. – 957 с.
9. Должанский Ю. М. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации свойств сплавов / Ю. М. Должанский, Ф. С. Новик, Т. А. Чемлева. – М. : ОНТИ, 1974. – 132 с.

References

1. Ryabcev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013). *Teoriia i praktika naplavocnih rabot [Theory and practice of surfacing]*. Ekotehnologiya.
2. Pfender, L.F. (2003). Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies. *Cambridge International Science Publishing*, 1 (Plasma Torches. Basic Studies and Design), 20-41.
3. Lashenko, G.I. (2003). *Plazmennoe uprochnenie i napylenie [Plasma hardening and spraying]*. Ekotehnologiya.
4. Kuzmin, V.I., Vashenko, S.P., Gulyaev, I.P., Karataev, E.V., Sergachyov, D.V., Kornienko, E.E., Dolmatov, A.V. (2015). Plazmennoe napylenie iznosostojkih pokritij iz poroshkov samoflyusu-yushihhsya splavov [Plasma spraying of wear-resistant coatings from powders of self-fluxing alloys]. *Vestnik Yurginskogo gosudarstvennogo uniersiteta – Bulletin of the Yurga State University*, 2(37), 45-52.
5. Lebedev, V.A., Loj, S.A. (2019). Modernizaciya plazmotrona dlya napyleniya na vozduhe i v kontroliruemoj atmosfere (v vakuume) [Modernization of the plasma torch for sputtering in air and in a controlled atmosphere (in vacuum)]. *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu “HIII”. Seriya: Novi rishennya v suchasnih tehnologiyah – Bulletin of the National Technical University “XIII”. Series: New solutions in modern technologies*, (10), 21-29.
6. Pavlowski, L., John Wiley. (2008). *Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* (2nd ed.). Sons Ltd.
7. Gubin, S.V., Yakovlev, A.I. (2009). *Teoriia planirovaniia eksperimentov v energetike: Kurs lektzii dlia vysshih tehniceskikh uchebnyh zavedenii [A course of lectures for higher technical educational institutions, Theory of planning experiments in the energy sector]*. Millenium.
8. Himmelblau, D. (1973). *Analiz processov statisticheskimi metodami [Analysis of processes by statistical methods]*. Izdatelstvo “Mir”.

9. Dolzhanskii, Yu.M., Novik, F.S., Chemleva, T.A. (1974). *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii i optimizatsii svoistv splavov [Planning an experiment in the study and optimization of the properties of alloys]*. ONTI.

Отримано 01.02.2022

UDC 533.924:620.18

Vladimir Lebedev¹, Serhii Loi², Vladimir Spihtarenko³

¹Doctor of Technical Sciences, Chief designer
SF “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²Associate Professor of the Department of Welding
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University (Kherson, Ukraine)

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

³Associate Professor of the Department of Welding
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University (Kherson, Ukraine)

E-mail: vladimir.kherson11@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9791>

POSSIBILITIES OF IMPROVING THE QUALITY OF PLASMA SPRAYING WHEN STRENGTHENING AND RENOVATING UNITS AND DETAILS AGRICULTURAL AND OTHER MACHINERY

The work is devoted to finding ways for improving the mechanical properties of the plasma-sprayed layer on the surface of parts and assemblies of agricultural and other equipment in order to give them certain qualities in the restoration or strengthening.

It is determined that there are a number of methods and ways to restore and strengthen components and parts, where electric arc surfacing, including flux electrode wire, is the most common. This technology has a number of advantages but there are a number of disadvantages that do not allow electric arc surfacing to be used in some cases, in particular in the surfacing of sheet material and more.

An alternative to arc surfacing, or its supplement, is plasma spraying, which can eliminate the existing shortcomings of surfacing. But spraying has its drawbacks, one of the main of which is the weak adhesive properties, accompanied by a low value of the adhesion of the powder that is sprayed to the surface of the part.

The search for a way to increase the adhesion of the sprayed layer to the surface of the assembly and the part led to the choice as a component of the self-fluxing alloy, which gives the sprayed layer strength and reduce unwanted inclusions.

But an even greater effect can be achieved by introducing into the powder being sprayed, a special slag, which surfacing from melting further increases the adhesion of the sprayed layer to the surface.

A mathematical model of the influence of the amount of flux and force parameters of the plasma on the adhesion parameter is developed, and the optimal parameters of the process and materials on the adhesion characteristics are found by mathematical methods.

This is confirmed by experimental studies and can be used in practical work in the implementation of real technology - plasma spraying.

A large number of specimens of a special shape made of 40X steel were used for spraying experiments. Experimental work was carried out on the installation, which was upgraded to improve the process. Control of energy parameters of spraying was applied.

To make it clearer to choose the optimal dependence of the strength of the plasma coating on the main parameters of the process and determine the maximum value of strength for the example built a graph of dependence, which is based on certain regression models.

Keywords: plasma spraying; powder components; process parameters; optimal calculation.

Fig.: 5. **Table:** 4. **References:** 9.