

**ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЮ
ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА ЯКІСТЬ
ПОКРИТТЯ КОНТАКТІВ, ВІДНОВЛЕНИХ ГАЗОПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ**

В. В. Коробський, кандидат технічних наук, доцент

А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук, доцент

Б. М. Бондарчук, студент магістратури

E-mail: kor.vladlen.2002@gmail.com

Анотація. Встановлено закономірності впливу електричних характеристик пристрою електродугового розряду та температури при газоплазмовому процесі на якість покриття відновлених контактів електромагнітних пускачів; досліджено параметри якості покриття від електричних характеристик технологічного процесу газоплазмового напилювання. Встановлені закономірності створення якісних покриттів на контакт-деталях з високими характеристиками.

Загалом, на процес формування покриття при газоплазмовому напилюванні і в кінцевому рахунку на його якість, безпосередньо або опосередковано впливає значна кількість факторів. При цьому, важливим є, з однієї сторони, вибір показників процесу формування покриття, а з іншої - виділення із загальної маси найбільш суттєвих значимих та обмежуючих факторів.

Всі основні фактори можуть бути розділені на декілька основних груп:

- фактори, які пов'язані з конструкцією механізму напилення і різних пристроїв для напилювання та плазмотрону (конфігурація і довжина каналу, вихідний діаметр сопла; розміщення точки подавання і кут вводу в плазмовий струмінь порошку; діаметр каналу подавання порошку; тиск і витрата охолоджувальної води; режим роботи системи газового охолодження напиленої контакт-деталі тощо);

- фактори, які пов'язані з властивостями напиленого матеріалу (вид матеріалу – порошок або провід; хімічний склад, розмір і форма проводу або часток порошку; фізико-хімічні і теплофізичні властивості матеріалу тощо);

- фактори, які пов'язані з формою та розмірами контакт-деталі і властивостями матеріалу контактотримача (товщина, кривизна напиленої поверхні; наявність кромок, пазів тощо; хімічний склад, механічні і теплофізичні властивості основи тощо);

- фактори, які пов'язані з попередньою підготовкою поверхні контактотримача до нанесення покриттів (шорсткість поверхні; попереднє підігрівання основи тощо);

- фактори, що характеризують режим роботи плазмотрону (сила струму і напруга; вид і витрата плазмоутворюючого і транспортуючого газів; витрата порошку або швидкість подавання проводу тощо).

До речі, ця багатofакторність процесу ще ускладнюється можливістю різноманітних випадкових збурень, неконтрольованою зміною окремих факторів

особливо в умовах газоплазмового напилювання ручним способом (приміром, дистанція напилювання; кут нахилу плазмотрону до напиленої поверхні; характер і швидкість відносного переміщення плазмотрону та контактотримача; кількість проходів плазмотрону тощо). Наприклад, ерозія каналу аноду і зношування катоду змінюють конструктивні характеристики горілки, нестабільність електричних параметрів джерела живлення, пульсація в подаванні порошку впливають на умови нагрівання і руху часток.

Ключові слова: газоплазмове напилювання, контактний матеріал, міцність зчеплення, коефіцієнт використання порошку, плазмотрон

Актуальність. Раніше було зазначено, що відновлення контактів комутаційних апаратів нанесенням покриттів зношеного робочого шару газоплазмовим напилюванням - найбільш простий, економічно-доцільний спосіб відновлення [1]. Якість покриття загалом визначається режимами напилювання. Розроблені за останні роки математичні моделі руху і нагрівання часток при напилюванні газоплазмових покриттів [2, 3] дали можливість аналітично оцінити вплив параметрів напилювання на якість покриття.

Однією з найбільш важливих експлуатаційних характеристик, що відноситься до якості покриття, є міцність зчеплення. Міцність зчеплення покриття з підкладкою можна визначити як властивість першого порядку (тільки при умові забезпечення її необхідного рівня має зміст визначати інші властивості). Численні дослідження працездатності виробів з покриттям впевнено показали, що не дивлячись на те, що вплив зовнішнього середовища відчувають поверхні покриття (особливо контакти апаратів в тваринництві), основною причиною їх руйнування є недостатній зв'язок між матеріалами покриття і основи [3, 4].

Тому важливе значення для розвитку процесу газоплазмового напилювання в цілому має питання розробки методики експериментального визначення міцності зчеплення. Можна зазначити, що отримані значення сили зчеплення не відображають величини адгезії, а є скоріше технічною характеристикою. Руйнування носять загалом змішаний когезійно-адгезійний або когезійний характер. Тому показник міцності зчеплення загалом не може бути використаний одноосібно для поточного контролю процесу формування покриття і його якості особливо в тих випадках, коли необхідно використання неруйнуючих методів. Проведений нами аналіз теоретичних моделей і

наших експериментальних досліджень процесу газоплазмового напилювання показує, що його критеріями можуть слугувати також коефіцієнт використання порошку (КВП) та пористість [1, 5, 6]. Ці параметри також найбільше застосовуються зараз при використанні методів багатофакторного кореляційного аналізу для досліджень і оптимізації процесу газоплазмового напилювання.

Дослідження впливу різноманітних факторів на якість та товщину покриття показали, що залежності в багатьох випадках носять екстремальний характер, а це ще більше ускладнює задачу оптимізації процесу газоплазмового напилювання.

Мета дослідження – дослідити вплив електричних характеристик електродугового розряду на якість покриття контактів комутаційних апаратів на основі міді при технологічному процесі відновленні газоплазмовим напиленням.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення досліджень використовувалися матеріали, які придатні для виготовлення контактів або які слугують легуючими домішками до сплавів, Композиційні матеріали виготовлені на основі міді та нікелю з домішками металів та інших термодинамічно стійких з'єднань [7] (див. таблицю).

Для статистичної оцінки параметрів режиму плазмового напилення від важкості плавлення були відібрані біля тридцяти різноманітних матеріалів (металів, оксидів, сплавів, тугоплавких з'єднань).

Для експериментальних комутаційних досліджень застосовувались контакт-деталі пускача ПМЛ-3200-О4, що відновлені композиційним матеріалом $85\%Cu+10\%Mo+2\%MoO_3+1\%C+2\%Ni$ [8]. Отримання контактного матеріалу здійснювалося методами порошкової металургії.

У процесі проведення досліджень використовувалися різні технологічні процеси напилювання. Застосовувалися принципи аналізу просторово-часової структури розвитку теплових і динамічних процесів, що супроводжують удар, розтікання і кристалізацію напилених частинок при формуванні покриттів.

Для вимірювання температури використовувався портативний інфрачервоний пірометр TermoPoint 64+ фірми FLIR Systems AB.

Результати досліджень та їх обговорення. Однією з основних характеристик якості покриття є температура, яка виникає в зоні контакту напиленої частки з поверхнею. Звичайно, чим вище температура, тиск в контакт і більший час їх дії, тим в більш повній мірі відбувається активація основи і хімічна взаємодія матеріалів. Але збільшення температури і швидкості часток не обов'язково призводить до інтенсифікації взаємодії. Це відбувається внаслідок розвитку процесів струменевого розтікання і руйнування розплавлених часток при співударянні.

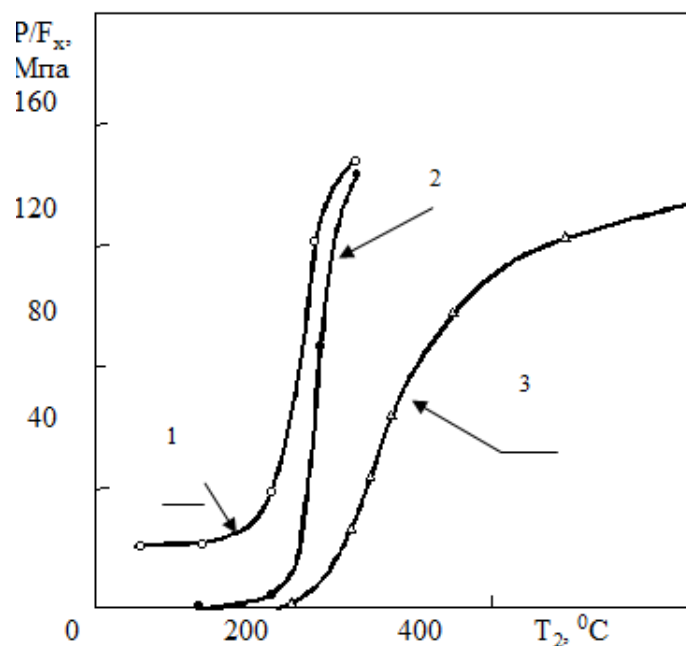


Рис. 1. Вплив перегрівання срібних часток і швидкості співударяння V_1 на міцність їх зчеплення P/F_x зі срібною основою:

- 1 – напилені частки мають температуру вище температури плавлення ($V_1 \approx 40$ м/с);
 - 2 – частки розплавлені при температурі, що наближена до температури плавлення ($V_1 \approx 20$ -40 м/с);
 - 3 – розплавлені частки співударяються з основою при невеликій швидкості ($V_1 < 5$ м/с);
- P – зусилля відривання; σ_T – тимчасовий опір срібла при розтягуванні

Перегрівання напилених часток вище температури плавлення $T_{пл}$ підвищує міцність їх з'єднання з основою (рис. 1, криві 1, 2) і збільшує площу плями хімічної взаємодії. Зростання міцності пояснюється тим, що при перегріванні часток підвищується контактна температура і процес хімічної взаємодії різко

прискорюється. Тому покриття слід наносити розплавленими частками і, по можливості, нагрітими до високої температури.

Задача кількісного розрахунку температури контакту T_k може бути вирішена як задача контактної теплопровідності з урахуванням фазового переходу [9]:

$$T_k = \frac{T_{пл} K_\varepsilon}{K_\varepsilon + \Phi(\alpha)}, \quad (1)$$

де $T_{пл}$ – температура плавлення частки; $K_\varepsilon = b_q/b_p$ – коефіцієнт теплової активності частки; b_q, b_p – коефіцієнти акумуляції тепла частки і поверхні відповідно; $\Phi(\alpha)$ – таблична функція інтегралу імовірності.

Розрахунки показують, що температура T_k при плазмовому напилюванні відповідає твердому стану частки і підкладки. Глибина зони термічного впливу під часткою не перевищує декількох десятків мікрометрів. Тому процеси фізико-хімічної взаємодії при напилюванні, мабуть, не зачіпають основного матеріалу підкладки, а проходять в приповерхневому шарі.

Другим важливим засобом підвищення якості покриття є збільшення швидкості напилених часток, яка сприяє прискоренню і інтенсифікації фізико-хімічних процесів в контакті, а отже, підвищенню міцності та поліпшенню інших характеристик покриття.

Існує межа швидкості часток. При напилюванні зі швидкістю нижче цієї межі міцність їх зчеплення різко знижується. "Повільні" частки мало деформуються і майже не розтікаються при ударі, в результаті чого контактні процеси взаємодії матеріалів частки і основи порушуються. Встановлено, що при швидкості часток $V_1=5$ м/с зростання їх міцності зчеплення з основою уповільнюється (рис. 1, крива 3), одночасно дуже слабо збільшується відносний діаметр плями хімічної взаємодії і за абсолютною величиною не перевищує $D_x/D < 0,5$, коли і основа достатньо підігріта.

Таким чином, для розплавлених часток необхідно узгоджувати їх температуру і швидкість. Це основна задача, яку потрібно вирішити при оптимізації режимів напилювання.

При напилювання твердими пластифікованими частками збільшення швидкості супроводжується збільшення міцності зчеплення покриттів з виходом на насичення,

що обумовлене розплавленням порошкового матеріалу при ударі. При цьому міцність зчеплення досягає декількох сотень МПа, тобто вона подібна до міцності самих матеріалів. Але при невеликих швидкостях часток, міцність зчеплення розплавлених часток завжди вище, ніж твердих.

Спроби теоретичного розрахунку величини адгезії, що утворилася між покриттям і підкладкою на основі того чи іншого механізму, показали, що обраховані і виміряні значення відрізняються на один-два порядки. Цю невідповідність можна пояснити двома причинами: структурними дефектами межі розподілу і механічними напруженнями в системі покриття-основа. До структурних дефектів відносяться неповнота фізичного контакту покриття і основи та неповний розвиток міжатомних зв'язків в зонах контакту. З урахуванням наявності напруження сила зчеплення покриття з основою може бути виражена залежністю [5]:

$$F_{зч} = \frac{A}{r} - f(\tau), \quad (2)$$

де A – робота адгезії; r – радіус дії міжатомних сил тяжіння; $f(\tau)$ – функція, що залежить від величини напруги в шарі покриття.

В умовах газоплазмового напилювання реальні випадки, коли $f(\tau)$ перевищує за своєю величиною A/r і відбувається самовільне відшаровування покриття. Тому питанню вивчення формування при плазмовому напилюванні залишкових напружень в покритті і підкладці приділяється велика увага.

При оптимізації процесу напилювання необхідно також враховувати вимоги мінімізації залишкового напруження. На основі результатів теоретичного аналізу і експериментальних даних запропоновано ряд методів керування залишковим напруженням в газоплазмових покриттях контактів. До них відносяться узгодження властивостей матеріалу покриття і основи; регулювання термічного впливу струменя плазми і потоку напилених часток; зниження модуля пружності матеріалу покриття, використання перехідних шарів між основою і покриттям, що забезпечують плавний перехід властивостей від покриття до основи; зміна форми напиленої поверхні. Зниження залишкового напруження також може бути

забезпечено при рівномірному охолодженні покриття шляхом високої швидкості охолодження послідовно нанесених тонких шарів або повільним охолодженням покриття з використанням додаткового підігрівання. Найбільш ефективне охолодження формуючого покриття і контактотримача. Для цього збільшують відносну швидкість переміщення розпилювачу і основи, створюють газові екрани, які відхиляють газовий струмінь від деталі тощо. Ефективність тепловідводу підвищується в 15-20 разів при підведенні в стиснене повітря 3-5 ваг.% дистильованої води, а ще більше при напилюванні у воді. Швидкість охолодження впливає також і на фазовий склад покриття, який визначає тип і параметри кристалічної решітки і питомий об'єм матеріалу. Питання зниження залишкових напружень в покритті має особливе значення при відновленні контакт-деталей комутаційних апаратів, що характеризуються високою робочою температурою та магнітним полем складної конфігурації. Коли до цього додати те, що параметри напилювання повинні бути узгоджені зі станом (в першу чергу з рівнем дефектності) і фізико-хімічними властивостями основи, тоді стає зрозумілою наскільки складна задача оптимізації режимів нанесення і якості газоплазмових покриттів.

Мінімальну електричну потужність, що необхідна для розплавлення часток дисперсного матеріалу при руху їх в об'ємі плазмового струменю, можна оцінити, виходячи з виразу для одинарної кулястої частки, що приведена в [10]. Формула справедлива для попередньої інженерної оцінки режиму плазмового напилювання конкретного матеріалу. У випадку аргонного плазмового струменю, коли ступінь дисоціації мінімальний, отримаємо вираз для оцінки необхідної електричної потужності P плазмотрону [5]:

$$P = UI \geq 24,4 \frac{V_{\Gamma}^{1,5} d_{\text{ч}} D^{0,5}}{\eta_{\Gamma} R_0 [I_{\text{вн}} + 6R_0(1 - \varepsilon)]^{0,5}}, \quad (3)$$

де U, I – напруга та струм плазмотрону; V_{Γ} – витрата порошку; $d_{\text{ч}}$ – діаметр частки; D – параметр важкості плавлення [60]; η_{Γ} – термічний коефіцієнт корисної дії

плазмотрону; $R_0, l_{\text{вн}}$ – радіус та довжина сопла аноду; ε – відносна віддаль траєкторії руху частки від осі струменю ($\varepsilon=R/R_0$); R – радіус плями напилення.

Статистична оцінка зв'язку між комплексом $(U/V_{\Gamma}^{1,5}) \cdot (1/d_{\text{ч}})$ і $D^{0,5}$ за газоелектричним режимом напилювання різноманітних матеріалів показала наявність залежності, що наближена до лінійної, з коефіцієнтом парної кореляції 0,82 (рис. 2).

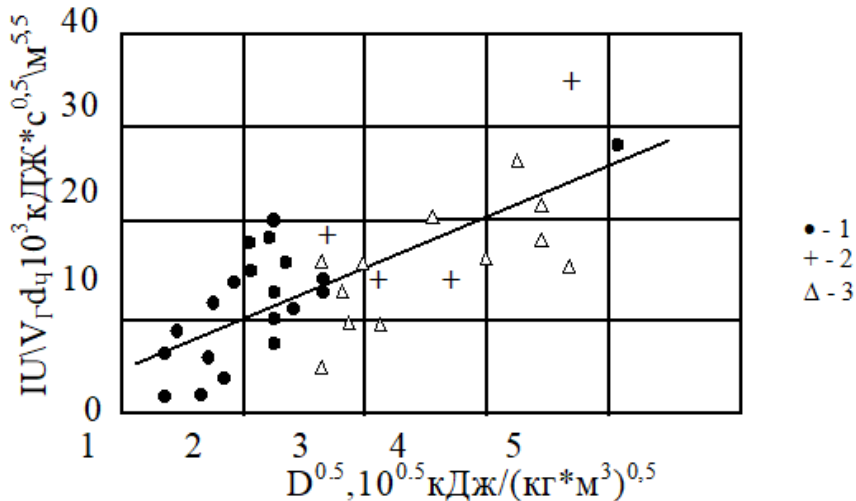


Рис. 2. Залежність режиму плазмового напилювання матеріалу від параметру важкості плавлення:

1 – метали, сплави, чисті елементи; 2 – оксиди; 3 – тугоплавкі з'єднання

Оскільки напруга U загалом визначається конструкцією плазмотрону і складом плазмоутворюючого газу, то при наявності матеріалу визначеної дисперсності вибір режиму його напилювання полягає у встановленні оптимальної комбінації сили струму і витрати плазмоутворюючого газу при вихідному мінімальному рівні відношення: $I^n / V_{\Gamma}^m \geq K_p d_{\text{ч}} D^{0,5} U^{-1}$. Нижній рівень витрати газу в багатьох випадках пов'язаний з умовами роботи аноду і оцінюється в межах 25-35 дм³/хв.

Другим важливим показником якості нанесення покриття газоплазмовим методом є коефіцієнт використання порошку (КВП), що є відношенням маси покриття m_n до маси порошку, який подавався в газовий струмінь m_p . Цей показник також називають ефективністю напилювання η або коефіцієнтом відкладання. Він

не тільки характеризує економічність процесу нанесення, але й використовується як параметр оптимізації, оскільки його максимальне значення в багатьох випадках співпадає з найкращими показниками якості покриття. Втрати порошку при газоплазмовому напилюванні, при напилюванні на неорганічну підкладку (у випадку напилювання на контакт-деталь з поперечним розміром менше перерізу струменю напиленого матеріалу виникають додаткові втрати), складається із втрат на відстрибування часток, які мають недостатній запас теплової енергії; на розбризкування перегрітого розплаву; на випаровування матеріалу часток. У зв'язку з цим залежність КВП від електричної потужності плазмотрону носить екстремальний характер. Використовуючи модель нагрівання і руху часток в плазмовому струмені, можна оцінити зв'язок КВП з газотермічним режимом роботи плазмотрону і властивостями напиленого матеріалу на висхідній частині цієї залежності.

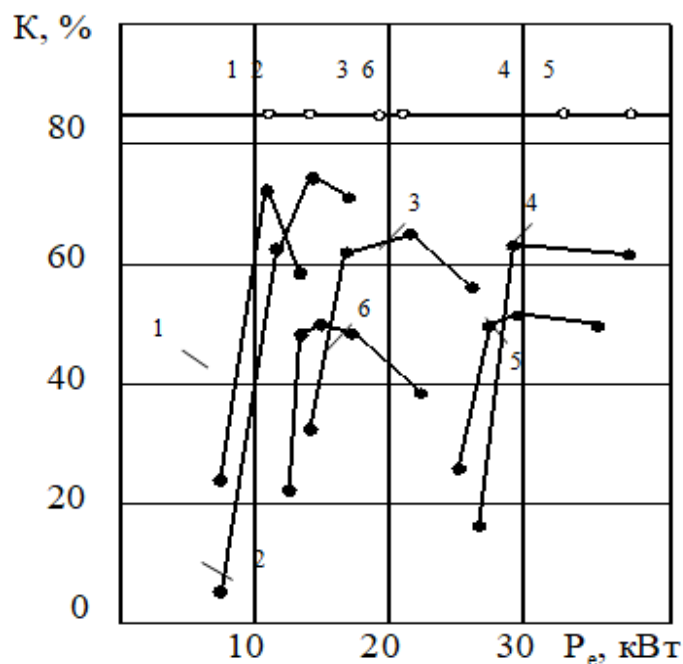


Рис.3. Вплив електричної потужності P_n плазмотрону УМП-5 на коефіцієнт використання матеріалу K :

1 - Al; 2 - W; 3 - Cr; 4 - Al_2O_3 ; 5 - TiB_2 ; 6 - Cr_3C_2 ; 7 - розрахунковий рівень K_{\max}

Для випадків нагрівання порошку в аргоновому плазмовому струмені, на плазмотронах вітчизняних установок, маємо:

$$\eta = \frac{m_n}{m_p} = \text{КВП} = \left[1,555 - 3,68 \cdot 10^9 \frac{V_r^3 d_q^2 D}{(IU_{\eta_T})^2} \right]^2. \quad (4)$$

Експериментально отримана залежність КВП для різноманітних матеріалів свідчить про задовільне співпадіння експерименту з попередньою оцінкою (рис. 3).

У таблиці наведені дані для матеріалів за витратою і коефіцієнтом використання порошку при газоплазмовому напилюванні з використанням різноманітних газів (деякі дані - фірми "АВКО" (США) [7], інші – дані авторів).

Процес плазмового розпилення доцільно проводити при мінімальних значеннях питомої електричної енергії, яка витрачається на плавлення, перегрівання і випаровування металічного матеріалу. Ентальпія часток легко регулюється зміною питомої потужності дуги P_n . Практично при напилюванні цей параметр знаходиться в широких межах і складає 2000 - 10000 кДж/кг. Зі збільшенням P_n збільшується втрати перегрітого металу на випаровування і можливе розбризкування при формуванні покриття. Але збільшення ентальпії температури часток позитивно впливає на якість газоплазмового покриття (рис. 4).

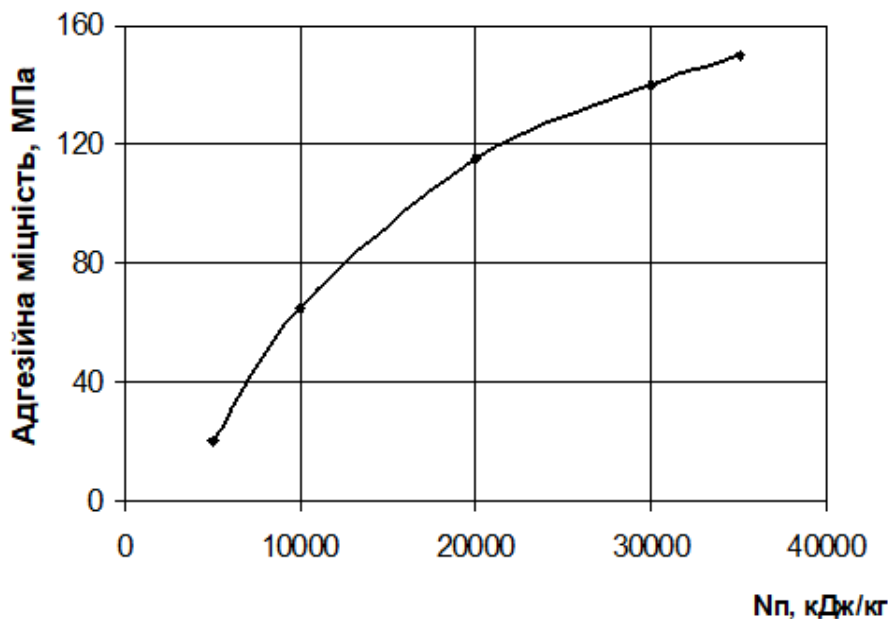


Рис. 4. Вплив питомої потужності дуги плазмотрону N_n на адгезійну міцність $F_{3ч}$.

Витрата порошку [кг/год] (чисельник) і коефіцієнт його використання (знаменник) при газоплазмовому напилюванні

Матеріал (склад, % мас.)	Клас крупності порошку	Плазмоутворюючий газ			
		Ar	Ar+H ₂	N ₂	N ₂ +H ₂
1. Алюміній	крупний	1,68/0,78	2,13/0,72	2,08/0,70	1,90/0,64
2. Вольфрам	крупний	4,30/0,63	3,53/0,51	8,56/0,64	8,79/0,65
	дрібний	3,99/0,67	-/-	-/-	-/-
3. Мідь	крупний	4,98/0,65	5,8/0,73	4,67/0,60	4,89/0,63
	дрібний	3,71/0,63	3,71/0,74	-/-	-/-
4. Молібден	крупний	2,36/0,88	1,36/0,50	7,75/0,81	8,06/0,84
5. Нікель	крупний	3,90/0,71	7,11/0,87	5,57/0,68	5,25/0,64
6. Ніхром	крупний	3,71/0,71	4,85/0,92	4,30/0,80	3,67/0,69
7. Нікелевий самофлюсуючий сплав (78%Ni+10%Cr+2,5%B)	крупний	1,50/0,73	1,81/0,93	1,68/0,81	1,72/0,84
8. Нікелевий самофлюсуючий сплав (70%Ni+17%Cr+3,7%B)	крупний	1,95/0,79	1,95/0,79	2,17/0,88	2,17/0,88
9. Монель-метал (69%Ni+28Cu)	крупний	5,21/0,76	4,89/0,71	5,12/0,74	3,99/0,59
10. Оксид алюмінію	середній	2,49/0,60	1,90/0,57	1,90/0,57	3,08/0,94
	дрібний	0,91/0,75	1,36/0,97	1,09/0,75	1,09/0,75
11. Оксид алюмінію-діоксид титану (97,5%Al ₂ O ₃ +2,5%TiO ₂)	дрібний	1,09/0,75	0,86/0,58	0,59/0,38	0,95/0,62
12. Діоксид цирконію	середній	1,0/0,55	1,27/0,54	2,27/0,62	2,67/0,59
	дрібний	1,36/0,63	1,04/0,48	0,95/0,43	1,22/0,59
13. Силікат цирконію (циркон)	середній	2,90/0,78	1,27/0,57	1,90/0,43	-/-
14. Карбід вольфраму (80%WC+20%Co)	крупний	2,36/0,52	6,39/0,52	6,57/0,54	6,39/0,52
	середній	7,47/0,75	9,01/0,65	8,06/0,58	7,84/0,57
	дрібний	2,85/0,71	-/-	-/-	-/-
15. Композиційний порошок "нікель-оксид алюмінію" (20%Ni+80%Al ₂ O ₃)	середній	2,04/0,60	2,08/0,63	2,31/0,71	2,27/0,70
16. Композиційний порошок "нікель-карбід титану" (45%Ni+55%TiC)	середній	3,22/0,72	3,17/0,76	-/-	-/-
17. Механічна суміш "карбід вольфраму-нікелевий самофлюсуючий сплав" (66%WC+34%NiCrBSi)	дрібний	2,54/0,75	-/-	-/-	-/-
18. Композиційний порошок "нікель-графіт": (75%Ni+25%С) (85%Ni+15%С)	крупний	1,22/0,74	-/-	-/-	-/-
	крупний	1,59/0,74	-/-	-/-	-/-
19. Композиційний порошок 85%Cu+10%Mo+ +2%MoO ₃ +1%С+2%Ni	крупний	2,58/0,73	-/-	-/-	-/-
	дрібний	2,25/0,68	-/-	-/-	-/-

Експериментально нами встановлено, що при газоплазмовому напилюванні мідного порошку підвищення P_n з 3000 до 8500 кДж/кг (при постійній подачі порошку) температура напилених часток зростає з 1173 до 2173 К.

Вибрана потужність плазмотрону ($P_{п}$) визначає як продуктивність процесу, так і ентальпію струменю часток, при цьому ефективний ККД розпилення повинен складати 0,70 - 0,85. Потужність дуги визначається значеннями струму і напруги. Напруга дуга, як правило, є нерегульованим параметром.

Необхідну величину потужності встановлюють безпосередньо змінюючи струм дуги. На практиці використовують потужності від 5 до 20 кВт, силу струму 80 - 600 А і напругу 18 - 35 В.

Висновки і перспективи. Способи поліпшення якості покриття при газоплазмовому напилюванні можуть бути такі.

Для досягнення високої міцності зчеплення газоплазмових покриттів з основою технологічний процес їх нанесення повинен забезпечувати, по-перше, можливість здійснення хімічної взаємодії напилених часток з основою і, по-друге, найбільш повну релаксацію напружень в зоні з'єднання. Виконання цих умов реалізується шляхом застосування ряду технологічних прийомів і методів.

Можна запропонувати ряд рекомендацій з поліпшення міцності з'єднання плазмових покриттів з основою, які в основному направлені на більш повну реалізацію процесів міжатомної взаємодії при формуванні покриття. Використання цих прийомів призводить, загалом, або до підвищення T_k або до зниження енергії активації міжатомної взаємодії.

Практично на якість покриття при напилюванні впливають такі технологічні операції:

- підготовка порошкових матеріалів;
- підготовка поверхні основи перед напилюванням;
- вплив на міцність зчеплення в процесі напилювання;
- наступна обробка газоплазмових покриттів.

У сучасних установках плазмового напилювання якісні покриття із металевих матеріалів отримують при напилюванні вузьких фракцій порошку з діапазону розмірів 40-80 мкм. При напилюванні керамічних матеріалів (особливо оксидів) існує тенденція зменшення розмірів порошку до 10 мкм.

У загальному вигляді метою підготовки поверхні з'єднання матеріалів – формування властивостей поверхні, що полегшує її активацію в процесі взаємодії. У деяких випадках замість механічних або електричних способів підготовки поверхні на неї напилюють тонкий (0,05-0,1 мм) шар молібдену, який має властивість міцно зчіплюватися з досить гладкими шліфованими поверхнями і разом з тим забезпечує хорошу адгезію нанесеного зверху на нього металізаційного покриття.

Важливим також напрямком, який забезпечує подальше збільшення міцності зчеплення покриттів з основою, є вдосконалення наявного і розробка нового обладнання для газоплазмового напилювання. Основні тенденції вдосконалення обладнання пов'язані з вирішенням задачі збільшення швидкості напилення часток, підвищення температурного рівня процесу (при застосуванні напилювання в контрольованих атмосферах), забезпечення можливості нанесення покриттів із дрібнодисперсних порошків.

Одним із способів зниження пористості і збільшення міцності зчеплення плазмових покриттів є термічна і термомеханічна обробка. Розвиток процесів дифузії призводить до локалізації порожнин і об'ємній взаємодії на межі розподілу "основа-покриття", виникненню дифузійного прошарку, який забезпечує зростання міцності зчеплення.

На нашу думку, найбільш перспективним є нанесення покриття з наступним рідиннофазовим спіканням. Суть його полягає в тому, що враховуючи велику тривалість процесу спікання, доцільно проводити термообробку в присутності компоненту з легкоплавкого металу, який утворює дифузійні зв'язки між частками порошку і основою. При цьому міцність зчеплення підвищується до значень 50-200 МПа.

Список використаних джерел

1. Коробський В. В. Дослідження фізико-механічних властивостей контактних матеріалів електромагнітних пускачів, що нанесені газоплазмовим методом / В. В. Коробський, А. М. Мрачковський // Енергетика і автоматика. – 2019. – №6. – С. 146 – 163.

2. Разработка и применение технологии оборудования и материалов для газотермических процессов нанесения защитных покрытий: тез. докл. научно-практ. конф. 5-6 июня 1990, Минск, БССР / АН БССР, ФТИ и др. – Минск, 1990. – 72 с.
3. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Илющенко и др. – Минск: Беларуская наука, 1998. – 583 с.
4. Кулик А. Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин. – Л.: Машиностроение. Лен.отд., 1985. – 199 с.
5. Кадыров В. Х. Высокоэнергетические процессы газоплазменного напыления / В. Х. Кадыров. – К.: ИПМ, 1995. – 52 с.
6. Müller K., Stockel D., Rau G. The IRE Process for the Manufacture of Silverbased Composite Contact Materials / K. Müller, D. Stockel, G. Rau // Proceedings of the Twelfth International Conference on Electric Contact Phenomena and Thirtieth Annual Holm Conference on Electrical Contacts, sept. 17-21, 1984. – Chicago, Illinois. - 1984. - P. 237 - 242.
7. Анциферов В. Н. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов, А. М. Шмаков, С. С. Агеев. РАН Уральское отд. Ин-т металлургии (ред.). – Екатеринбург: Наука, 1994. – 318 с.
8. Пат. 1792445 АЗ СРСР, МКИ⁵ С 22 С9/00, Н 01 Н 1/02. Спечений матеріал для електричних контактів на основі міді / Г. М. Братерська, С. П. Коханівський, Т. О. Донцова, В. А. Наливайко, В. В. Коробський, А. М. Мрачківський (СРСР); заявник УСГА. – №5009871/02; заявл. 03.07.1991; опубл. 30.01.1993, Бюл. №4, 1993 р.
9. Сонин В. И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении / В. И. Сонин. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.
10. Кузнецов В. Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів / В. Д. Кузнецов, В. М. Пащенко. – К.: КПІ, 1999. – 176 с.

References

1. Korobskyi, V. V., Mrachkovskyi, A. M. (2019). Doslidzhennya fiziko-mekhanichnikh vlastivostey kontaktnikh materialiv elektromagnitnikh puskachiv. shcho naneseni gazoplazmovim metodom [Investigation of physical and mechanical properties of contact materials of electromagnetic actuators applied by gas-plasma method]. *Energetika i avtomatika*, 6, 146 – 163.
2. Razrabotka i primeneniye tekhnologii oborudovaniya i materialov dlya gazotermicheskikh protsessov naneseniya zashchitnykh pokrytiy. (1990). [Development and application of technology for equipment and materials for thermal gas processes for applying protective coatings]. *Tezisi dokladov nauchno-prakt. konf. 5-6 iyunya 1990. Minsk. BSSR / AN BSSR. FTI i dr. Minsk*, 72.
3. Vityaz, P. A., Ivashko, V. S., Ilyushchenko, A. F. (1998). *Teoriya i praktika naneseniya zashchitnykh pokrytiy*. [Theory and practice of applying protective coatings]. Minsk: Belaruskaya nauka, 583.
4. Kulik, A. Ya., Borisov, Yu. S., Mnukhin, A. S. (1999). *Gazotermicheskoye napyleniye kompozitsionnykh poroshkov*. [Thermal gas spraying of composite powders]. Leningrad: Mashinostroyeniye. Leningradskoye otdeleniye, 199.
5. Kadyrov, V. H. (1995). *Vyisokoenergeticheskie protsessy gazoplazmennogo napyleniya* [High-energy processes of gas-plasma spraying]. Kyiv: IPM, 52.

6. Müller, K., Stockel, D., Rau, G. (1984). The IRE Process for the Manufacture of Silverbased Composite Contact Materials. Proceedings of the Twelfth International Conference on Electric Contact Phenomena and Thirtieth Annual Holm Conference on Electrical Contacts, sept. 17-21, 1984, Chicago, Illinois, 237 – 242.

7. Antsiferov, V. N., Shmakov, A. M., Ageev, S. S. (1994). Hazotermicheskiye pokrytyia. [Gas thermal coatings]. RAS Ural Department Institute of Metallurgy (Ed.). Yekaterinburg: Science, 318.

8. Braterskaya, G. M., Kochanovsky, S. P., Dontsova, T. O., Nalyvayko, V. A., Korobskiy, V. V., Mravchkovskiy, A. M. Spechenyi material dlia elektrychnykh kontaktiv na osnovi midi. [Sintered material for electrical contacts on the basis of copper]. Patent of the USSR, no. 1792445 A3, MKI5 C 22 C9 / 00, H 01 N 1/02. The applicant of the USHA. – No. 5009871/02; stated. July 3, 1991; has published Jan 30, 1993, Bul. No. 4, 1993.

9. Sonin, V. I. (1973). Gazotermicheskoye napyleniye materialov v mashinostroyenii. [Gas-thermal spraying of materials in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 152.

10. Kuznetsov, V. D., Pashchenko, V. M. (1999). Fiziko-khimichni osnovi stvorenniya pokrytyy [Physico-chemical bases of creation of coverings]. Kyiv: KPI, 176.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЯ КОНТАКТОВ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ГАЗОПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

В. В. Коробский, А. М. Мрачковский, Б. М. Бондарчук

Аннотация *Выявлены закономерности влияния электрических характеристик устройства электродугового разряда и температуры при газоплазменном процессе на качество покрытия восстановленных контактов электромагнитных пускателей; исследованы параметры качества покрытия от электрических характеристик технологического процесса газоплазменного напыления. Установлены закономерности создания качественных покрытий на контакт-деталях с высокими характеристиками.*

В общем, на процесс формирования покрытия при газоплазменном напылении и в конечном счете на его качество прямо или косвенно влияет значительное количество факторов. При этом важно, с одной стороны, выбор показателей процесса формирования покрытия, а с другой, выделение из общей массы наиболее существенных значимых и ограничивающих факторов.

Все основные факторы могут быть разделены на несколько основных групп:

- факторы, связанные с конструкцией механизма напыления и различных устройств для напыления и плазмотрона (конфигурация и длина канала, выходной диаметр сопла, размещение точки подачи и угол ввода в плазменную струю порошка, диаметр канала подачи порошка; давление и расход охлаждающей воды, режим работы системы газового охлаждения напыленной контакт-детали и т.п.);

- факторы, связанные со свойствами напыленного материала (вид материала - порошок или провод; химический состав, размер и форма провода или частиц порошка, физико-химические и теплофизические свойства материала и т.д.);

- факторы, связанные с формой и размерами контакт-детали и свойствами материала контактодержателя (толщина, кривизна напыленной поверхности, наличие кромок, пазов и т.п.; химический состав, механические и теплофизические свойства основания и т.п.);

- факторы, связанные с предварительной подготовкой поверхности контактодержателя к нанесению покрытий (шероховатость поверхности; предварительный подогрев основы и т.п.);

- факторы, характеризующие режим работы плазмотрона (сила тока и напряжение, вид и расход плазмообразующего и транспортирующего газов; расход порошка или скорость подачи провода и т.д.).

Кстати, эта многофакторность процесса еще осложняется возможностью различных случайных возмущений, неконтролируемым изменением отдельных факторов, особенно в условиях газоплазменного напыления ручным способом (например, дистанция напыления, угол наклона плазмотрона к напыленной поверхности; характер и скорость относительного перемещения плазмотрона и контактодержателя, количество проходов плазмотрона и т.д.). Например, эрозия канала анода и износа катода изменяют конструктивные характеристики горелки, нестабильность электрических параметров источника питания, пульсация при подаче порошка влияют на условия нагрева и движения частиц.

Ключевые слова: газоплазменное напыления, контактный материал, прочность сцепления, коэффициент использования порошка, плазмотрон

INFLUENCE OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC ARC DISCHARGE DEVICE AND TEMPERATURE ON THE QUALITY OF THE COATING OF CONTACTS RESTORED BY THE GAS-PLASMA METHOD

V. Korobsky, A. Mrachkovskiy, B. Bondarchuk

Abstract. *The regularities of the influence of the electrical characteristics of the electric arc discharge device and the temperature during the gas-plasma process on the quality of the coating of the restored contacts of electromagnetic starters are revealed; the parameters of the quality of the coating on the electrical characteristics of the technological process of gas-plasma spraying are investigated. The regularities of creating high-quality coatings on contact parts with high characteristics have been established.*

In general, a significant number of factors directly or indirectly affect the process of coating formation during gas-plasma spraying and, ultimately, its quality. At the same time, it is important, on the one hand, to select indicators of the coating formation process, and on the other hand, to select the most significant and limiting factors from the total mass.

All major factors can be divided into several main groups:

- factors associated with the design of the spraying mechanism and various devices for spraying and the plasma torch (configuration and length of the channel, outlet diameter of the nozzle, location of the feed point and angle of entry into the plasma jet of powder, diameter of the powder supply channel; pressure and flow rate of cooling water; operating mode of the system gas cooling of the sprayed contact piece, etc.);

- factors associated with the properties of the sprayed material (type of material - powder or wire; chemical composition, size and shape of wire or powder particles, physicochemical and thermophysical properties of the material, etc.);

- factors related to the shape and size of the contact piece and the properties of the contact holder material (thickness, curvature of the sprayed surface, the presence of edges, grooves, etc.; chemical composition, mechanical and thermophysical properties of the base, etc.);

- factors associated with the preliminary preparation of the contact holder surface for coating (surface roughness; preliminary heating of the base, etc.);

- factors characterizing the operating mode of the spray device (current strength and voltage, type and consumption of plasma-forming and transporting gases; powder consumption or wire feed rate, etc.).

By the way, this multifactorial nature of the process is further complicated by the possibility of various random perturbations, uncontrollable changes in individual factors, especially in conditions of manual gas-plasma spraying (for example, the spraying distance, the angle of inclination of the spray device to the sprayed surface; the nature and speed of the relative movement of the spray device and contact holder, the number of spray device passes, etc.). For example, erosion of the anode channel and cathode wear change the design characteristics of the burner, instability of the electrical parameters of the power source, and pulsation during powder supply affect the heating and particle motion conditions.

Key words: *gas-plasma spraying, contact material, adhesion strength, powder utilization rate, spray device*