

УДК 621.316

ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ В ПРОЦЕСІ НАПИЛЮВАННЯ

Радько І.П., к.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Тел.: (044) 527-87-35

Анотація – розглянуто вплив на якість покриття контакт-деталей величини теплової і кінетичної енергії часток порошку, який наноситься на поверхню, розмірів часток, їх форми та хімічного складу.

Ключові слова – напилення, плазмотрон, електричний апарат, пускач, вимикач, контактор, контакт-деталь.

Постановка проблеми. Існує проблема відновлення контактів комутаційних апаратів, що експлуатуються в електроустановках тваринницьких ферм і комплексів. Серед методів відновлення контактів комутаційних апаратів набув поширення метод газоплазмового напилення.

Аналіз останніх досліджень. На процес формування покриття при газоплазмовому напилюванні і на його якість безпосередньо впливає значна кількість факторів. За оцінками різних дослідників їх кількість складає від 20 до 60 [1, 2, 3, 4]. В цих умовах важливим є, з однієї сторони, вибір показників процесу формування покриття, а з іншої – виділення із загальної маси найбільш суттєвих, лімітуючих факторів.

Формулювання мети статті. Метою статті є розробка наукових принципів відновлення робочої поверхні контактів методом газоплазмового напилення з використанням композиційних контактних матеріалів, які дозволяють продовжити тривалість роботи апарату, в цілому, й підвищити економічну ефективність його використання.

Основна частина. У процесі проведення досліджень формування покриття при газоплазмовому напилюванні використовувалися різні технологічні процеси напилення, металографічні та рентгеноспектральні аналізи робочого шару напилення. Застосовувалися принципи аналізу просторово-часової структури розвитку теплових і динамічних процесів, що супроводжують удар, розтікання і кристалізацію напилених частинок при формуванні покриттів.

Всі основні фактори впливу на процес формування покриття при газоплазмовому напилюванні можуть бути розділені на декілька основних груп:

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

2) Фактори, які пов'язані з напиленим матеріалом (вид матеріалу – порошок або провід; хімічний склад, розмір і форма проводу або часток порошку; фізико-хімічні і теплофізичні властивості матеріалу тощо).

3) Фактори, які пов'язані з конфігурацією контакт-деталі і властивостями матеріалу контактотримача (товщина, кривизна напиленої поверхні; наявність кромки, пазів тощо; хімічний склад, механічні і теплофізичні властивості основи тощо).

4) Фактори, які пов'язані з попередньою підготовкою 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).

Фактори, що характеризують процес взаємного переміщення плазмотрону і напиленого контакту (дистанція напилювання; кут нахилу плазмотрону до напиленої поверхні; характер і швидкість відносного переміщення плазмотрону та контактотримача; кількість проходів плазмотрону тощо).

Багатофакторність процесу ще ускладнюється можливістю різноманітних випадкових збурень, неконтрольованою зміною окремих факторів особливо в умовах газоплазмового напилювання ручним способом. 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 тощо.

Дослідження впливу різноманітних факторів на якість та товщину покриття показали, що залежності в багатьох випадках носять екстремальний характер (рис. 1). В зв'язку з цим оптимізація процесу газоплазмового напилювання – це складна задача.

Якість покриття загалом визначається режимами напилювання. Розроблені за останні роки математичні моделі руху і нагрівання часток при напилюванні газоплазмових покриттів [6, 7] дали можливість аналітично оцінити вплив параметрів напилювання на якість покриття.

Однією з найбільш важливих експлуатаційних характеристик, що відноситься до якості покриття є міцність зчеплення. Численні дослідження працездатності виробів з покриттям впевнено показали, що не дивлячись на те, що зовнішнє середовище впливає на поверхні покриття (особливо контакти апаратів в тваринництві), основною причиною їх руйнування є недостатній зв'язок між матеріалами покриття і основи [8, 9].

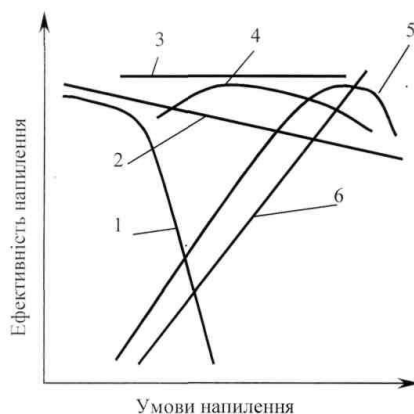


Рис. 1. Залежність ефективності напилювання від умов напилювання: 1 – віддаль напилювання; 2 – витрати порошку; 3 – швидкість переміщення контакт-деталі; 4 – витрати газу, що транспортує порошок; 5 – витрата робочого газу; 6 – підведена потужність.

Отримані значення сили зчеплення не відображають величини адгезії, а є скоріше технічною характеристикою. Руйнування носять загалом змішаний когезійно-адгезійний або чисто когезійний характер. Для всіх методик, що застосовуються, характерне розсіювання отримуваних експериментальних даних, причому в деяких діапазонах товщини покриттів воно дуже значне. В зв'язку з вищевказаним, 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 бути також коефіцієнт використання порошку (КВП) та пористість [10, 11, 12].

Однією з основних характеристик процесу формування 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 співударі. За критерієм відсутності

розвитку процесів струменевого розтікання часток оптимізують режим газоплазмового напилювання.

Перегрівання напилених часток вище температури плавлення $T_{пл}$ підвищує міцність їх з'єднання з основою (рис. 2, 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, за можливістю, нагрітими до високої температури.

Задача кількісного розрахунку температури контакту T_k може бути вирішена як задача контактної теплопровідності з урахуванням фазового переходу [13]

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

де $T_{пл}$ – температура плавлення частки;

$K_\varepsilon = b_u/b_n$ – коефіцієнт теплової активності частки;

b_u, b_n – 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 $V_1=5\text{м/с}$ зростання їх міцності зчеплення з основою уповільнюється, одночасно дуже слабо збільшується відносний діаметр плями хімічної взаємодії і за абсолютною величиною не перевищує $D_x/D < 0,5$, навіть 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. Активізація основи термосиловою дією розплавлених часток має фізичну межу.

Подібного недоліку не має процес напилювання твердими пластифікованими частками. Збільшення їх 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.

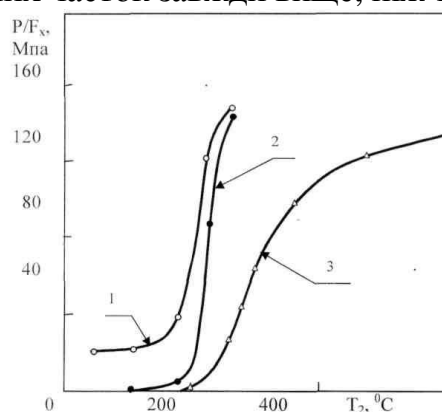


Рис. 2. Вплив перегрівання срібних часток і швидкості співударення V_1 , на міцність їх зчеплення P/F_x зі срібною основою: 1 – напилені частки мають температуру вище температури плавлення ($V_1 \approx 40$ м/с); 2 – частки розплавлені при температурі, що наближена до температури плавлення ($V_1 \approx 20-40$ м/с); 3 – розплавлені частки співударяються з основою при невеликій швидкості ($V < 5$ м/с); P – зусилля відривання; σ_{τ} – тимчасовий опір срібла при розтягу.

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 напругами в системі покриття-основа. До структурних дефектів належать неповнота фізичного контакту покриття і основи та неповний розвиток міжатомних зв'язків в зонах контакту. З урахуванням наявності напругисила зчеплення покриття з основою може бути виражена залежністю [10]

$$F_{3ч} = \frac{A}{r} - f(\tau), \quad (2)$$

де A – робота адгезії;

r – радіус дії міжатомних сил притягіння;

$f(\tau)$ – функція 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 напруг в покритті і підкладці приділяється велика увага.

При оптимізації процесу напилювання необхідно також врахувати вимоги мінімізації залишкової напруги. На основі результатів теоретичного аналізу і експериментальних даних запропонований ряд методів керування залишковою напругою в газоплазмових покриттях контактів. До них належать 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 залишкової напруги 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 ефективно 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 мас.% 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 залишкової напруги в покритті має особливе значення при відновленні контакт-деталей комутаційних апаратів, що характеризуються складним полем напруги. 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 струменя, можна оцінити, виходячи з наступного виразу (для одинарної кулястої частки) [14]

$$\frac{T_G \lambda_G^2}{[1 + f(\text{Re})] V_G \mu_G (1 + x_D)(1 + x_i)} L_q^{\min} \geq \frac{d_q^2 i_{\text{min}}^2 \rho}{273 * 4 \text{Nu}^2 \pi R_0^2} = D, \quad (3)$$

де L_q^{\min} – найменша довжина траєкторії частки;

T_G – температура;

λ_G – теплопровідність;

V_G – витрата порошку;

x_D – ступінь дисоціації;

x_i – ступінь іонізації;

μ_G – динамічна в'язкість газу;

d_q – діаметр частки;

ρ – густина матеріалу;
 i_{nl} – питома ентальпія розплаву при T_{nl} ;
 T_{nl} – температура плавлення частки;
 Re, Nu – критерії Рейнольдса і Нусельта;
 R_0 – радіус сопла аноду;
 D – параметр важкості плавлення [14]

$$D = (i_{пл} - n_q Q_{екз})^2 \rho (1 + 0,2Bi)^2, \quad (4)$$

де $Q_{екз}$ – питома масовий екзотермічний ефект взаємодії;
 n_q – ступінь використання екзотермічного ефекту на ділянці нагрівання матеріалу до розплавлення;
 Bi – критерій Біо.

Коли $Bi < 0,2$ параметр важкості плавлення може бути розрахований за таким виразом [14]

$$D = i_{пл}^2 \rho = \frac{I_{пл}^2}{\rho} = c_e^2 \rho T_{пл}^2, \quad (5)$$

де $I_{пл}$ – об'ємна питома ентальпія розплаву матеріалу частки при $T_{пл}$;
 $c_e = i_{пл} / T_{пл}$ – еквівалентна теплоємність розплаву при $T_{пл}$.

Вважаючи для виразу (3) $f(Re) = 0$ і $Nu = 2$, у випадку аргонового плазмового струменю ($x_D = 0$) отримуємо вираз для оцінки необхідної електричної потужності P плазмотрону [10]

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

де U, I – напруга та струм плазмотрону;
 ε – відносна віддаль траєкторії руху частки від осі струменю ($\varepsilon = R/R_0$);
 η_{Γ} – термічний коефіцієнт корисної дії плазмотрону.

Статистична оцінка зв'язку між комплексом $(UI/V_{\Gamma}^{1,5})(1/d_q) \cdot D^{0,5}$ по газоелектричному режиму напилювання 36 різноманітних матеріалів (металів, оксидів сплавів, тугоплавких з'єднань) показала наявність залежності, що наближена до лінійної, з коефіцієнтом парної кореляції 0,82.

В загальному вигляді вираз для попередньої інженерної оцінки режиму плазмового напилювання конкретного матеріалу може бути представлений в наступному вигляді [14]

$$I^n U \geq K_p V_{\Gamma}^m d_q D^{0,5}, \quad (7)$$

де K_p – постійна плазмотрону, що залежить від складу газу;
 n, m – степеневі показники при I та V_{Γ} , що обумовлені виглядом залежності $n_T = f(I, V_{\Gamma})$.

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.

Висновки. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження відновлення контактних вузлів дозволяють зробити такі основні висновки:

1. На якість покриття впливають величини теплової і кінетичної енергії часток порошку, якій наноситься на поверхню, розміри часток, їх форма та хімічний склад.

2. Основними факторами формування металопокриття є конструкція плазмотрону, хімічний склад, розмір і форма порошку, фізико-хімічні та теплофізичні властивості матеріалу порошку.

3. Однією з основних характеристик процесу формування покриття є температура, яка виникає в зоні контакту напиленої частки з поверхнею. Нагрівання часток вище температури плавлення підвищує міцність їх з'єднання з основою.

Література

1. *Коханівський С.П.* Вплив хімічного середовища на роботу комутаційних апаратів // Проблеми агропромислового комплексу: пошук, досягнення: Тези доп. наук. конф. проф.-викл. складу та аспірантів / *С.П.Коханівський, В.А.Наливайко, В.В.Коробський.* – К.: УДАУ, 1993. – С.75.

2. ГОСТ 2491-82 (СТ СЭВ 5535-86). Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.

3. ГОСТ 9.908-85 (СТ СЭВ 4815-84, СТ СЭВ 6445-88) Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.

4. Ионно-плазменные технологии получения пленок и покрытий // Сб. тез. докл. Научно-техн. конф., 17-20 сентября 1991. г. Полтава / РДЭНТП; Научн. ред. *С.В.Денбновецкий.* – К.:1991. – 52 с.

5. *Хасуи А.* Наплавка и напыление (пер. с японского) / *А.Хасуи, О.Моригаки.* – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.

6. Получение покрытий высокотемпературным распылением (сб. статей) / под ред. *Л.К.Дружинина и В.В.Кудинова.* – М.:Атомиздат, 1973. – 312 с.

7. Разработка и применение технологии оборудования и материалов для газотермических процессов нанесения защитных покрытий // Тез. докл. научно-практ. конф. Минск, 5-6 июня 1990 г. / АН БССР. ФТИ [и др.]. – Мн, 1990. – 72 с.

8. *Антошин Е.В.* Нанесение металлических и неметаллических покрытий посредством газоплазменного напыления / *Е.В.Антошин.* – М., 1965. – 72 с.

9. Газотермическое напыление композиционных порошков / *А.Я.Кулик, Ю.С.Борисов, А.С.Мнухин.* – Л.: Машиностроение. Лен.отд., 1985. – 199 с.

10. *Кадыров В.Х.* Высокоэнергетические процессы газоплазменного напыления / *В.Х. Кадыров.* – К.: ИПМ, 1995. – 52 с.

11. *Кречмар Э.* Напыление металлов, керамики и пластмасс / *Э. Кречмар.* – М.: Машиностроение, 1966. – 432 с.

12. *Muller K.* The IRE Process for the Manufacture of Silverbased Composite Contact Materials / *K. Muller, D. Stockei, 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.

13. *Сонин В.И.* Газотермическое напыление материалов в машиностроении / *В.И. Сонин.* – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.

14. *Кузнецов В.Д.* Фізико-хімічні основи створення покриттів: навчальний посібник для студентів спеціальності «Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій». Нац. техн. ун-т «КПІ» / *В.Д.Кузнецов, В.М. Пащенко.* – К.: КПІ, 1999. – 176 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ НАПЫЛЕНИЯ

Радько И.П.

Аннотация

Рассмотрено влияние на качество покрытия контакт-деталей величины тепловой и кинетической энергии частиц порошка, который наносится на поверхность, размеров частиц, их формы и химического состава.

FORMATION OF COMPOSITE COATING CONTACT DETAILS AND STUDY ON THE STRENGTH OF CLUTCH COATING PROCESS

I. Radko

Summary

The influence on the quality of coating the contact details of the value of thermal and kinetic energy of the particles of the powder that is applied to the surface, the size of the particles, their shape and chemical composition.