УДК 621.3.066.5/6:636 DOI 10.31548/energiya2020.06.028

ТОВЩИНА ПОКРИТТЯ ВІДНОВЛЕНОГО КОНТАКТУ ЕЛЕКТРИЧНОГО АПАРАТУ ТА МЕТОДИКА ЇЇ ВИЗНАЧЕННЯ

В. В. Коробський, кандидат технічних наук, доцент

С. В. Соболь, студент магістратури

С. О. Лапшин, інженер

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

Анотація. *Встановлені закономірності формування основних варіантів покриттів, що отримуються газоплазмовим напилюванням з наступним рідиннофазовим спіканням залежно від умов змочування часток порошку розплавом і пористості напиленого шару.*

Проведено аналіз методів контролю товщини газотермічних покриттів, де зазначено переваги та недоліки трьох способів вимірювання товщини: магнітного, електромагнітного (вихрових струмів) та металографічного.

Здійснено дослідження залежності теплової потужності плазмового струменю (безпосередньо впливає на товщину напиленого покриття) від теплового еквіваленту електричної потужності дуги; залежність характеризується ефективним коефіцієнтом корисної дії.

У результаті дослідження підраховані товщини напилених покриттів контактів і допуски на їх обробку залежно від висоти контакт-деталі.

Товщина покриття – найкоротша відстань між поверхнею покриття в даній точці і поверхнею основного металу. Будучи технологічною характеристикою, товщина впливає на таку важливу експлуатаційну властивість, як міцність з'єднання з основним металом. Збільшення товщини покриття вище оптимальної призводить не тільки до погіршення якості (зменшенню міцності з'єднання), але й до економічних витрат.

Нанесення покриття на задану площу відбувалося за рахунок лінійного переміщення плазмотрону в поєднанні або з поперечним зміщенням плазмотрону або контакт-деталі. При однократному лінійному переміщенні плазмотрону напилений матеріал утворює нерівномірний шар покриття, поперечний переріз якого описується кривою Гауса. Вимоги до товщини напиленого шару вказуються в технологічній документації, виходячи з рівномірності розподілу товщини покриття на поверхні контакту. Необхідна товщина напиленого покриття визначалася, виходячи з товщини робочого шару, допуску на наступну обробку та допуску на розміри контакт-деталі і товщину напиленого шару. Товщина напиленого покриття на контактах, у яких відновлюються втрачені розміри, передбачала допуск на наступну їх обробку: токарну і шліфувальну. У результаті були підраховані товщини напилених покриттів контактів і допуски на їх механічну обробку залежно від висоти контакт-деталі (кількості комутаційних циклів напилених контакт-деталей).

При газотермічному напилюванні покриттів нарощування деталей відбувається з порівняно високою швидкістю, тобто приблизно в 10 - 20 разів швидше, ніж електролітичне нанесення сталі, та приблизно в 100 - 200 разів швидше, ніж електролітичне хромування [1].

Ключові слова: ***товщина покриття, газоплазмове напилювання, контактний матеріал, густина, пористість, твердість, товщиномір, ефективний коефіцієнт корисної дії, мікрошліф***

Актуальність. Нанесення покриттів газоплазмовим розпиленням – один з найбільш простих, економічно-доцільних і розвинених процесів відновлення розмірів зношених поверхонь деталей машин і, зокрема, робочих поверхонь контакт-деталей електричних комутаційних апаратів.

Методи контролю товщини покриттів, а також терміни і визначення основних понять в області вимірювання товщини стандартизовані [4, 5, 6]. Аналіз літератури показав, що для газотермічних покриттів використовується три способи вимірювання товщини: магнітний, електромагнітний (вихрових струмів) та металографічний.

Відривний магнітний метод базується на вимірюванні за допомогою зусилля пружини, яке необхідне прикласти до магніту для відриву його від поверхні покриття, що напилене на основний метал. За силою відриву магніту контролюється товщина покриття. Метод добре зарекомендував себе у виробничих умовах. Для визначення товщини покриттів спочатку будуються градуйовані криві для еталонних зразків з відомою товщиною покриття. Метод застосовується для оцінки товщини немагнітних покриттів, нанесених на феромагнітну основу, можливе використання його в тих випадках, коли магнітні властивості матеріалів різко відрізняються. Деякі прилади, засновані на цьому методі, випускаються серійно (товщиномір конструкції Н. С. Акулова, ИТП-5 тощо) і характеризуються простотою конструкції та портативністю. Межі вимірювання цими товщиномірами складають 0 - 2000 мкм; невелика похибка вимірювання ±10 %, час вимірювання 5-6 с.

Електромагнітний метод базується на реєструванні вимірювання взаємодії власного магнітного поля котушки з електромагнітним полем, що наводяться цією

котушкою в деталі з покриттям. Котушка індуктивності утворює змінне магнітне поле, в якому розташовують контакт з покриттям. У поверхневому шарі виникають вихрові струми, магнітне поле яких взаємодіє з полем котушки індуктивності й викликає зміни її повного опору. Величина цієї зміни, що фіксується вимірювальним приладом, залежить від товщини покриття. За допомогою електромагнітного методу можна виміряти товщини будь-яких сплавів основного металу і покриття, за виключенням діелектричних покриттів на діелектрику. Вітчизняною промисловістю випускається декілька типів товщиномірів, що базуються на принципі електромагнітного методу. Найбільше розповсюдження отримали такі типи приладів: ВТ-30Н та ВТ-40НЦ. Діапазон вимірювання товщини від 0 до 1000 мкм, похибка вимірювання – 5 %, шорсткість поверхні покриття не повинна бути більша Rz=20 мкм. Перший прилад має стрілку, інший – цифрову індикацію.

Магнітний та електромагнітний методи відносяться до неруйнуючих методів контролю. Головною вимогою до приладів неруйнуючого контролю є виключення впливу сторонніх факторів на результати замірів товщини. Граничний ефект, підвищена шорсткість, зміна фізико-хімічних властивостей й структури основного металу та покриття – всі ці обставини призводять до зміни показання приладу. Магнітний й електромагнітний методи застосовуються в виробничих умовах для вимірювання товщини покриттів при масовому відновленні поверхні контактів.

Металографічний метод є руйнуючим і можливий тільки для лабораторних досліджень. Сутність методу полягає у вимірюванні товщини покриття за допомогою оптичних мікроскопів на поперечних шліфах. Приготування шліфу повинно виконуватися відповідно до рекомендацій для виготовлення металографічних зразків. Якщо між покриттям і основним металом відсутня чітка межа, то для отримання найбільшого контрасту можна застосовувати травлення шліфу. Недоліками метода є порівняно велика трудомісткість та можливість проводити вимірювання тільки в площинні шліфу.

Мета дослідження – встановити закономірності формування основних варіантів покриттів, що отримуються газоплазмовим напилюванням з наступним

рідиннофазовим спіканням залежно від умов змочування і пористості напиленого шару та дослідити залежності оптимальної товщини напилених покриттів контактів і допусків на їх механічну обробку залежно від висоти контакт-деталі.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення досліджень використовувався контактний матеріал, яким відновлені контакт-деталі пускача ПМЛ-3200-О4. Матеріал виготовлений на основі міді з домішками металів та інших термодинамічно стійких з'єднань: 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni [3]. Для порівняння фізико-механічних властивостей використовувалися матеріали: мідь М; латунь Л62; алюміній А99; матеріал СОК15: 85%Ag+15%CdO.

Отримання контактного матеріалу здійснювалося методами порошкової металургії.

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

Товщину покриття відновлених контакт-деталей вимірювали за допомогою металографічного методу. Відносна похибка вимірювання $\pm$ 10 %. Аналіз товщини та мікроструктури складу зразків матеріалів проводяться за допомогою оптичного металографічного мікроскопу МИМ-8. Для протравлення металографічних шліфів зразків застосовується 10%-ний розчин персульфату амонію. Шліфи виготовляються на поверхні поперечного і повздовжнього перерізу зразків контакт-деталей в такій послідовності: шліфування на шліфувальному папері з різною величиною зерна, потім полірування на фетрі, який змочений водною суспензією оксиду хрому.

Твердість (мікротвердість) напилених покриттів визначається за допомогою приладу ПМТ-3. Дослідження проводили на трьох зразках кожного КМ. На кожному зразку здійснюється не менше п'яти замірів.

Міцність зчеплення визначається випробуванням зразків на розтягування і розрив на розривній машині РМУ-0,05-1,0 (згідно ГОСТ 7855-84).

Визначення шорсткості поверхні контакт-деталей здійснюється за допомогою профілографу-профілометру, моделі 201 (похибка вертикального збільшення – 5 %). При цьому реєструється як параметр R_a (середнє арифметичне відхилення мікронерівностей від середньої лінії профілю), так і виконується записування в збільшеному масштабі мікронерівностей поверхні на електротермічному папері.

Результати досліджень та їх обговорення. Специфічний механізм утворення покриттів з напилених матеріалів (міді, алюмінію, СОК-15, дослідного 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni) та складність виготовлення експериментальних зразків для проведення комутаційних випробувань визначили необхідність проведення спеціальних досліджень властивостей напилених покриттів: міцності при розтягуванні і стисканні, пружних характеристик напруженого стану, теплового розширення і теплопровідності та комутаційної зносостійкості відновлених контактів [2].

У процесі газоплазмового напилювання окислення міді відбувається в широкому діапазоні температур, що при швидкому охолодженні часток обумовлює наявність двох оксидів – закису Cu_2O (11 %) та оксиду CuO (1 %). Загальний вміст кисню складає 1,42 %. У структурному відношенні композиції на основі міді є конгломератом окислених часток, розділених порожнинами. Оксиди у вигляді монолітних плівок розміщуються на межах часток. Насиченість оксидами окремих частинок і різноманітних ділянок неоднакова, що зумовлює варіацію товщини покриття та мікротвердості в межах 60-100 НВ.

Природно, що всі наведені фізико-механічні властивості напиленого матеріалу обумовлюються технологічними параметрами режиму напилювання, які суттєво впливають на радіус розсіювання матеріалу. Радіус розсіювання залежить від конструкції плазмотрону (діаметру аноду, способу газової стабілізації тощо) та режиму напилювання (електричної потужності, складу і витрати плазмоутворюючого газу, відстані напилювання). Як правило, його значення знаходиться в діапазоні 4 - 8 мм.

Товщина напиленого покриття пропорційна тепловій потужності плазмового струменю q. Відношення теплової потужності струменю q до теплового еквіваленту

електричної потужності дуги характеризує ефективний коефіцієнт корисної дії η' процесу нагрівання:

$$\eta' = \frac{q}{UI}, \tag{1}$$

де U, I – напруга та струм електричної дуги.

Експерименти показують, що ефективний ККД при газоплазмовому напилюванні залежить від напруги дуги і може коливатися в межах від 0,35 до 0,90 (рис. 1). Збільшення довжини дуги, що призводить до зростання напруги дуги, різко знижує ефективність нагрівання. Наприклад, при розпилювання цинку η' складає 0,9 при напрузі U = 20 В, а в іншому випадку при напрузі 60 В ККД знижується до значення 0,4. Вимірюання показують, що сума анодного і катодного спадів напруги в цьому процесі складає 19,09 - 19,99 В. Таким чином, при зменшенні довжини дуги основним джерелом нагрівання стають активні плями дуги, використання яких підвищує ефективність напилювання.

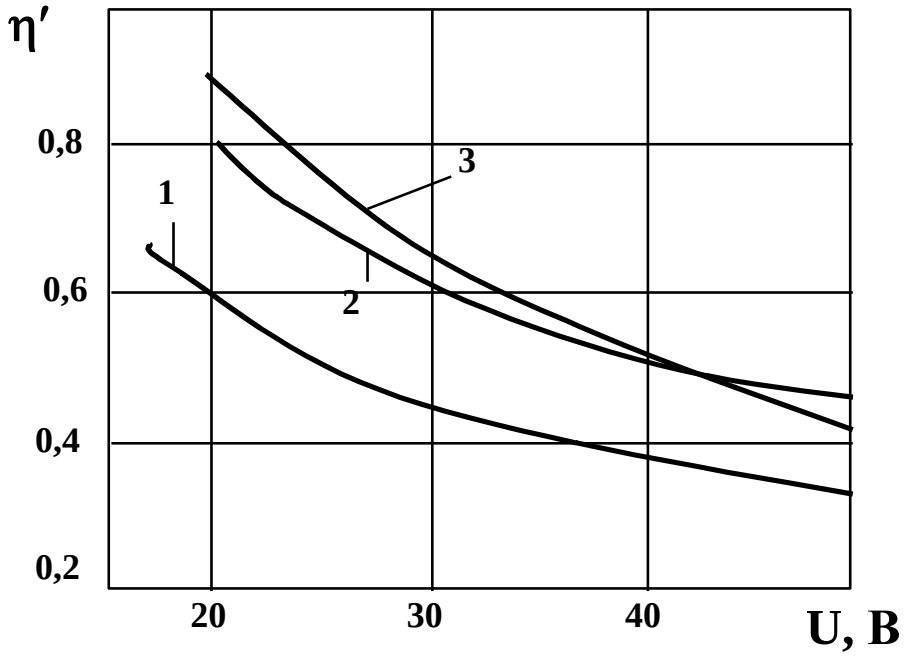

Рис. 1. Залежність ефективного ККД нагрівання η′ від напруги дуги плазмотрону:

1 – напилення алюмінію А-99; 2 – матеріалу 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni;

3 – матеріалу СОК-15

Товщина покриття відновленого контакту і методика її визначення.

Товщину покриття визначають, виходячи із вимог і службових властивостей контакт-деталей. Для отримання рівномірної товщини покриття необхідно переміщувати плазмотрон вздовж оброблюваної поверхні з постійною швидкістю. При цьому напилені полоси повинні перекривати одна одну.

Щоб отримати покриття великої товщини, виконують напилювання в декілька шарів. При цьому кожний наступний шар наноситься переміщення апарату в напрямку, що перпендикулярний напрямку попереднього нанесення. Товщина нанесених покриттів регулюється кількістю проходів. За кожний прохід можна напилювати шар, товщина якого в залежності від швидкості переміщення плазмотрону може коливатися в межах 0,03 - 0,2 мм.

Товщина шару в різноманітних покриттях коливається в дуже широким межах і залежить від призначення покриття, технології його нанесення, матеріалів, що входять до складу покриття тощо. Найбільше зустрічаються покриття з товщиною одного шару від 10 до 100 мкм.

Нанесення покриття на задану площу відбувається за рахунок лінійного переміщення плазмотрону в поєднанні з обертанням деталі (при напилюванні тіл обертання) або з поперечним зміщенням плазмотрону або контакт-деталі (при напилюванні на площину). При однократному лінійному переміщенні плазмотрону напилений матеріал утворює валок покриття, поперечний переріз якого описується кривою Гауса:

$$h = h_0 e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \qquad (2)$$

де h_0 – товщина покриття на вісі валка; r – відстань від вісі валка; r_0 – радіус розсіювання.

Радіус розсіювання залежить від конструкції плазмотрону (діаметру аноду, способу газової стабілізації тощо) та режиму напилювання (електричної потужності, складу і витрати плазмоутворюючого газу, відстані напилювання). Як правило, його значення знаходиться в діапазоні 10 -15 мм.

Величина h_0 може бути визначена за виразом:

$$h_0 = \frac{G_П КВП}{1{,}77\rho\omega_л r_0}, \tag{3}$$

де $G_п$ – витрата порошку, кг/с; КВП – коефіцієнт використання порошку; ρ - густина матеріалу порошку, кг/м^3; $\omega_л$ – швидкість лінійного переміщення плазмотрону, м/с.

За межу валка приймають точку, де товщина покриття складає $0{,}05h_0$, тобто ширина валка з виразу (2) дорівнює $1{,}73r_0$. У результаті накладання одинарних валків утворюється суцільне покриття, геометричні характеристик котрого (середня товщина та хвилястість) пов'язані з параметрами керування формою. До числа цих параметрів відносяться лінійна швидкість руху плазмотрону $\omega_л$, поперечне зміщення (або крок напилювання) s, витрата порошку $G_п$.

Товщина покриття в будь-якій точці поперечного перерізу δ(x) (x=0 на вісі першого валка) при накладанні n валків з кроком s:

$$\delta(x) = \frac{G_П КВП}{\sqrt{\pi}\rho\omega_л r_0} \cdot \sum_{i=1}^{n} e^{\frac{-[x-(i-1)s]^2}{r_0^2}}. \tag{4}$$

При цьому:

$$\delta_{max} = \frac{G_П КВП}{\sqrt{\pi}\rho\omega_л r_0} \cdot \left(1 + 2e^{-\frac{s^2}{r_0^2}}\right);$$

$$\delta_{min} = \frac{G_П КВП}{\sqrt{\pi}\rho\omega_л r_0} \cdot \left(e^{-\frac{s^2}{4r_0^2}} + e^{-\frac{9s^2}{4r_0^2}}\right). \tag{5}$$

Таким чином, відносна хвилястість покриття в значній мірі залежить від співвідношення s/r_0 . При $s/r_0 \le 1{,}2$ хвилястість менше 1 %, а при $s/r_0 = 1{,}6$ – досягає 8 %.

Необхідну товщину напиленого покриття визначають, виходячи з товщини робочого шару, допуску на наступну обробку і допуску на розміри контакт-деталі і товщину напиленого шару. Товщина напиленого покриття на контактах, у яких відновлюються втрачені розміри, повинна передбачати допуск на наступну їх обробку: токарну і шліфувальну.

Методика розрахунку товщини покриття з урахуванням допусків на обробку викладена нижче і зображена на рис. 2. Товщина покриття h, котре нарощується на зовнішню поверхню, може визначатися за формулою (рис. 2 А):

$$h = (L - d) + b, \tag{6}$$

де L – номінальна товщина контакту; d – товщина контакту після підготовки до напилювання; b – допуск на обробку після напилювання.

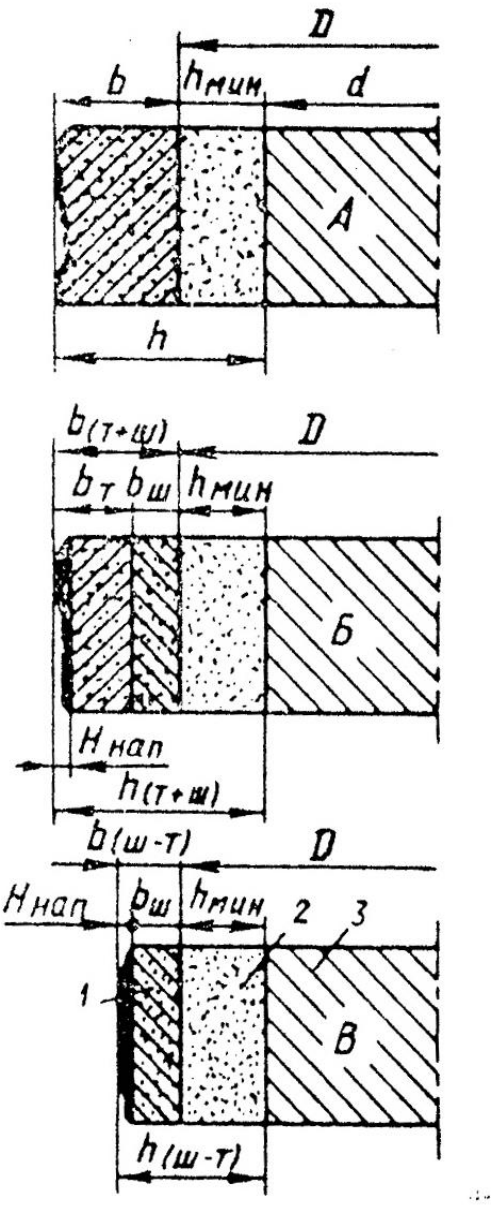

Рис. 2. Схеми до розрахунку товщини покриття контакту з урахуванням допусків на обробку:

1 – допуск на обробку; 2 – напилений шар покриття, який залишається після обробки; 3 – основний метал деталі

Для забезпечення необхідної міцності покриття його товщина після кінцевої обробки h_{min} не повинна бути меншою визначеної величини [7]. У таблиці показано, що ця величина, залежно від товщини контакт-деталі електромагнітного пускача ПМЛ-3200-04, знаходиться в межах від 0,6 до 1,0 мм.

Для токарної обробки напилених деталей покриття наноситься з допуском b_T, який залежить від товщини деталі і, крім того, обумовлюється ступенем рівномірності покриття по товщині. Допуск b_T знаходиться в прямій залежності від висоти нерівностей напиленого покриття $H_{нап}$. Нерівності покриття будуть, в свою чергу, тим менше, чим вище кваліфікація оператора установки. Величина допуску b_T буде також залежати від кваліфікації токаря, який спеціалізується на обробці напилених деталей. Величина допуску b_T практично може знаходитись в межах 0,5 – 1,0 мм.

Допуск на шліфування до необхідного розміру після проточування $b_ш$ залежить від якості абразивних кругів і точності верстату. Ця величина приймається в межах 0,15 - 0,20 мм.

Товщина відновлюваного покриття і допуск на її механічну обробку

Найменування даних	Позначення за методикою	При товщині контакту, мм						
		до 1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	5,5-6,5	6,5 і більше
1. Мінімально допустима товщина шару після кінцевої обробки, мм	H_{min}	0,60	0,60-0,65	0,65-0,70	0,70-0,80	0,85-0,90	0,95-1,00	1,10-1,20
2. Допуск на токарну обробку (орієнтовні дані), мм	b_T	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	1,00
3. Загальний допуск на токарну обробку і наступне шліфування, мм	$b_{(т+ш)}$	0,65-0,70	0,75-,80	0,85-0,90	0,95-1,00	1,05-1,10	1,10-1,15	1,15-1,20
4. Мінімальна товщина покриття для наступної обробки і шліфування, мм	$h_{(т+ш)}$	1,25-1,30	1,35-1,45	1,50-1,60	1,70-1,80	1,90-2,00	2,05-2,15	2,25-2,40
5. Допуск на шліфування без попереднього обточу-вання, мм	$b_{(ш-т)}$	0,35-0,40	0,40-0,45	0,45-0,50	0,50-0,60	0,60-0,70	0,70-0,80	0,80-0,90
6. Мінімальна товщина покриття для наступного шліфування без попе-реднього обточування, мм	$h_{(ш-т)}$	0,95-1,00	1,00-1,10	1,10-1,20	1,25-1,40	1,45-1,60	1,65-1,80	1,90-2,10

Таким чином, загальний допуск на токарну і шліфувальну обробки $b_{(т+ш)}$ може бути підрахований як сума допусків $b_т$ і $b_ш$ (рис. 2 Б):

$$b_{(т+ш)} = b_т + b_ш. \quad (7)$$

Звідси мінімальну товщину покриття для наступної токарної і шліфувальної обробки $h_{(т+ш)}$ можна підрахувати за формулою:

$$h_{(т+ш)} = h_{min} + b_{(т+ш)}. \quad (8)$$

У ряді випадків напилена контакт-деталь обробляється до розміру шліфуванням без попередньої токарної обробки (рис. 2 В). Допуск на шліфування без попередньої токарної обробки $b_{(ш-т)}$ буде більше, ніж допуск $b_ш$ на величину висоти нерівностей $H_{нап}$:

$$b_{(ш-т)} = b_ш + H_{нап}. \quad (9)$$

У цих випадках мінімальна товщина покриття $h_{(ш-т)}$ підраховується за формулою:

$$h_{(ш-Т)} = h_{min} + b_{(ш-т)}. \quad (10)$$

Користуючись викладеною методикою, а також даними М. В. Катц і Є. М. Линник [8], були підраховані товщини напилених покриттів контактів і допуски на їх обробку залежно від діаметрів відновлюваних деталей. Вихідні дані і результати підрахунків зведені в таблицю.

Розглянемо формування товщини покриття у випадку попереднього нанесення прошарку, що характерно для процесу плазмового напилення з наступним рідиннофазовим спіканням. Однією з основних умов його успішного практичного нанесення є зберігання прошарку після операції напилення на нього порошкового покриття, що суттєво відрізняється від відомої технології газотермічного напилювання порошка на тонкий легкоплавкий прошарок товщиною, яка не перевищує 10 - 15 мкм. При технології рідиннофазового спікання метал прошарку частково випаровується і частково переходить до об’єму покриття.

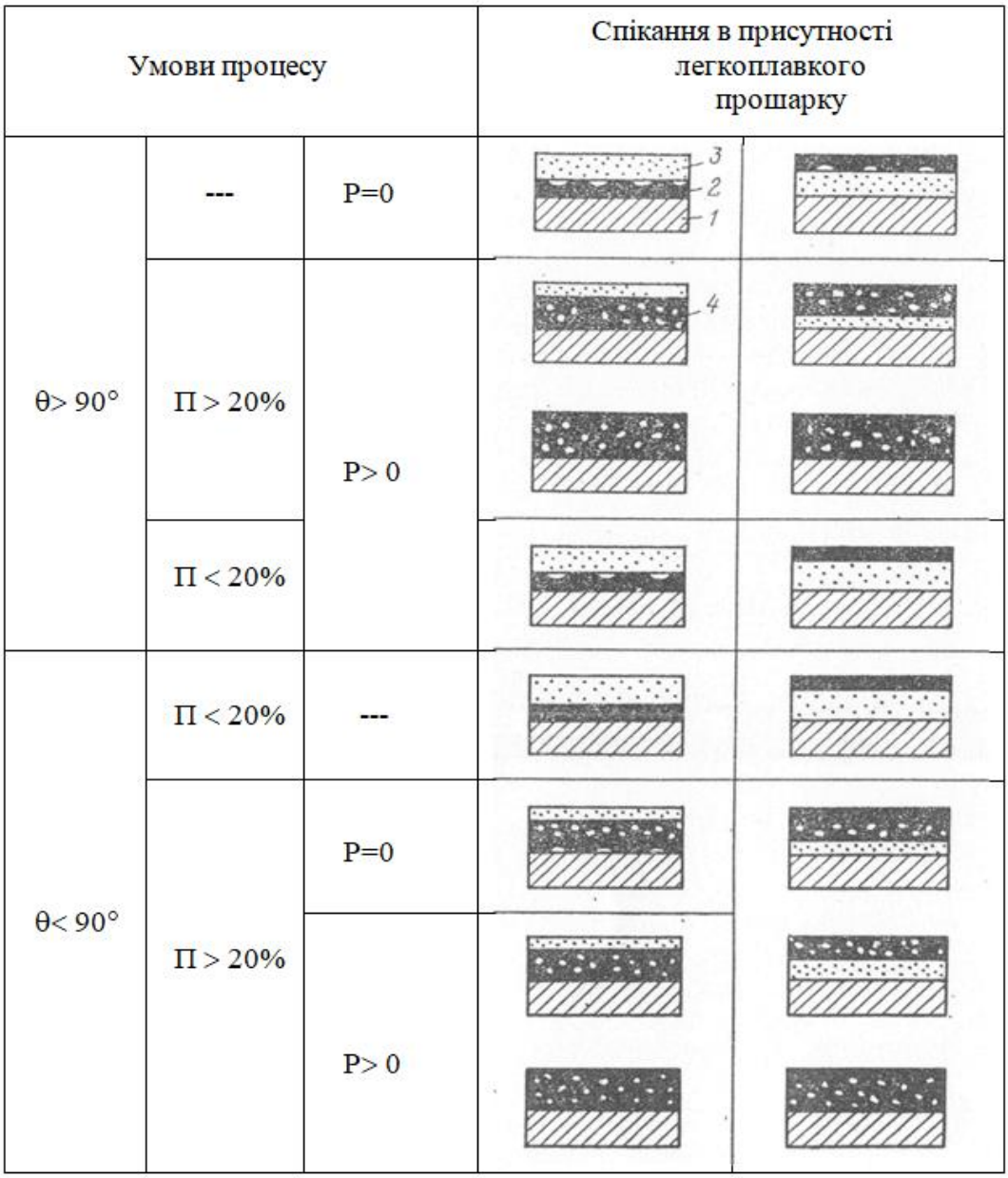

Рис. 3. Основні варіанти покриттів, що отримуються газоплазмовим напилюванням з наступним рідиннофазовим спіканням:

1 – основа; 2 – легкоплавкий прошарок; 3 – порошкове покриття;

4 – композиційне покриття

Залежно від умов змочування часток порошку розплавом і пористості напиленого шару можливе утворення різноманітних варіантів композиційних покриттів (рис. 3). При поганому змочуванні ($\theta > 90°$, θ - граничний кут змочування) на межі прошарок – покриття спостерігається розриви суцільності, які призводять до значного зменшення міцності покриття. Ефективно цей недолік можна усунути

проведенням термообробки. Максимального ефекту можна досягнути при відкритому стані пористості. При цьому залежно від товщини прошарку і покриття, а також початкової пористості утворюються дві основні модифікації: 1) одношарове композиційне покриття; 2) двошарове покриття, яке складається з нижнього композиційного і верхнього пористого шарів. Перша модифікація реалізується при виконанні співвідношення:

$$\delta \geq h(1-\vartheta) = h_0 \Pi_0 + \Delta h\,, \tag{10}$$

де δ - товщина легкоплавкого прошарку; h – кінцева товщина покриття; h_0 – початкова товщина покриття; Δh – усадка покриття; ϑ - об'ємний вміст основного матеріалу; Π_0 – початкова пористість покриття.

Для другої модифікації, яка відповідає виразу:

$$\delta \prec h(1-\Pi) = h_0 \Pi_0 + \Delta h\,, \tag{11}$$

товщини нижнього і верхнього шарів відповідно дорівнюють:

$$\begin{gathered} h_1 = \delta \cdot \left[1 - \frac{h_0}{h}(1-\Pi_0)\right]^{-1}, \\ h_2 = h - h_1\,. \end{gathered} \tag{12}$$

Міцне з'єднання покриття з основою забезпечується спільним механічним зчепленням легкоплавкого металу з порошковим каркасом в об'ємі композиційного шару.

Висновки і перспективи.

1. Газотермічне напилювання дає можливість наносити працездатні покриття практично будь-якої необхідної товщини (0,01 - 10 мм). Процес напилювання при нормальних умовах і режимах можна проводити з нагріванням контактів до температури не більше 100 °С.

2. Розроблена методика розрахунку товщини відновлюваного покриття з урахуванням допуску на її механічну обробку.

3. Для газоплазмового напилювання створені композиційні контактні матеріали, що виготовляється методами порошкової металургії такого складу: 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni.

4. Міцне з'єднання покриття з основою забезпечується спільним механічним зчепленням легкоплавкого металу з порошковим каркасом в об'ємі композиційного шару.

5. Встановлено закономірності формування основних варіантів покриттів, що отримуються газоплазмовим напилюванням з наступним рідиннофазовим спіканням залежно від умов змочування часток порошку розплавом і пористості напиленого шару, а саме одношарового композиційного покриття та двошарового покриття, яке складається з нижнього композиційного і верхнього пористого прошарків.

Список використаних джерел

1. 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.

2. 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.

3. Пат. 1792445 А3 СРСР, МКИ^5 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.

4. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 – [Чинний від 2008-01-10], − М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с. – (Міждержавний стандарт).

5. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення: ДСТУ 2823-94 – [Чинний від 1996-01-01], − К.: Держспоживстандарт України, 1995. – 33 с. – (Національний стандарт України).

6. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними: ДСТУ 3004-95 – [Чинний від 1997-01-01], − К.: Держспоживстандарт України, 1995. – 123 с. – (Національний стандарт України).

7. Аппараты электрические коммутационные. Контакты на основе серебра. Технические условия: ГОСТ 19725 – 74 – [Чинний від 1974-01-09], − М.: Изд - во стандартов, 1984. – 50 с. – (Міждержавний стандарт).

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

References

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

2. 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.

3. 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.

4. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Pryamyie izmereniya s mnogokratnyimi nablyudeniyami. Metodyi obrabotki rezultatov nablyudeniy. Osnovnyie polozheniya: DSTU GOST 8.207:2008 – [Chynnyi vid 2008-01-10] (Mizhderzhavniy standart) [State system for ensuring uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods for processing observation results. Basic provisions: Interstate standard 8.207:2008 number] (2006), Standartinform, 7.

5. Znosostiykist virobiv. Tertya, znoshuvannya ta maschennya. Termini ta viznachennya: DSTU 2823-94. [Chynnyi vid 1996-01-01] (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Wear resistance of products. Friction, wear and lubrication. Terms and definitions: State Standard of Ukraine 2823-94 number] (1995), Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 33.

6. Nadiinist tekhniky. Metodi otsinki pokaznikiv nadiynosti za eksperimentalnimi danimi: DSTU 3004-95.. [Chynnyi vid 1997-01-01] (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Reliability of equipment. Methods for assessing reliability indicators based on experimental data: State Standard of Ukraine 3004-95 number] (1995), Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 123.

7. Apparatyi elektricheskie kommutatsionnyie. Kontaktyi na osnove serebra. Tehnicheskie usloviya: GOST 19725-74. [Chynnyi vid 1974-01-09] (Mizhderzhavniy standart) [Electrical switching devices. Silver contacts. Specifications: Interstate standard 19725-74 number] (1984), Izdatelstvo standartov, 50.

8. Ionno-plazmennyie tehnologii polucheniya plenok i pokryitiy. (1991). [Ion-plasma technologies for producing laminas and coatings]. Sb. tez. dokl. nauchno – tehn. konf., 17 - 20 sentyabrya 1991. Nauchn. red. S. V. Denbnovetskiy. Poltava, Ukraina, RDENTP. Kyiv, 52.

ТОЛЩИНА ПОКРЫТИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО КОНТАКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА И МЕТОДИКИ ЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В. В. Коробский, С. В. Соболь, С. О. Лапшин

Аннотация. *Установлены закономерности формирования основных вариантов покрытий, получаемых газоплазменным напылением с последующим жидкофазным спеканием в зависимости от условий смачивания частиц порошка расплавом и пористости напыленного слоя.*

Проведен анализ методов контроля толщины газотермических покрытий, где указано преимущества и недостатки трех способов измерения толщины: магнитного, электромагнитного (вихревых токов) и металлографического.

Проведено исследование зависимости тепловой мощности плазменной струи (непосредственно влияет на толщину напыленного покрытия) от теплового эквивалента электрической мощности дуги; зависимость характеризуется эффективным коэффициентом полезного действия.

В результате исследования подсчитаны толщины напыленных покрытий контактов и допуски на их обработку в зависимости от высоты контакт-детали.

Толщина покрытия - кратчайшее расстояние между поверхностью покрытия в данной точке и поверхностью основного металла. Являясь технологической характеристикой, толщина влияет на такое важное эксплуатационное свойство, как прочность соединения с основным металлом. Увеличение толщины покрытия выше оптимальной приводит не только к ухудшению качества (уменьшению прочности соединения), но и к экономическим издержкам.

Нанесение покрытия на заданную площадь происходило за счет линейного перемещения плазмотрона в сочетании либо с поперечным смещением плазмотрона или контакт-детали. При однократном линейном перемещении плазмотрона напыленный материал образует равномерный слой покрытия, поперечное сечение которого описывается кривой Гаусса. Требования к толщине напыленного слоя указываются в технологической документации, исходя из равномерности распределения толщины покрытия на поверхности контакта. Необходимая толщина напыленного покрытия определялась, исходя из толщины рабочего слоя, допуска на последующую обработку и допуска на размеры контакт-детали и толщину напыленного слоя. Толщина напыленного покрытия на контактах, в которых восстанавливаются утраченные размеры, предусматривала допуск на следующую их обработку: токарную и шлифовальную. В результате были подсчитаны толщины напыленных покрытий контактов и допуски на их механическую обработку в зависимости от высоты контакт-детали (количества коммутационных циклов напыленных контакт-деталей).

При газотермического напыления покрытий наращивания деталей происходит со сравнительно высокой скоростью, то есть примерно в 10 - 20 раз быстрее, чем электролитическое нанесение стали и примерно в 100 - 200 раз быстрее, чем электролитическое хромирование.

Ключевые слова: ***толщина покрытия, газоплазменное напыления, контактный материал, плотность, пористость, твердость, толщиномер, эффективный коэффициент полезного действия, микрошлиф***

COATING THICKNESS OF THE RESTORED CONTACT OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND THE METHOD OF ITS DETERMINATION

V. Korobsky, S. Sobol, S. Lapshin

Abstract. *The regularities of the formation of the main variants of coatings obtained by gas-plasma spraying with subsequent liquid-phase sintering, depending on the conditions of wetting the powder particles with the melt and the porosity of the sprayed layer, have been established.*

The analysis of methods for controlling the thickness of thermal gas coatings, which indicates the advantages and disadvantages of three methods of measuring the thickness: magnetic, electromagnetic (eddy currents) and metallographic.

The research of the dependence of the thermal power of the plasma jet (directly affects the thickness of the sprayed coating) on the thermal equivalent of the electric power of the arc was carried out; dependence is characterized by an effective efficiency.

As a result of the research, the thickness of the sprayed coatings of the contacts and the tolerances for their processing were calculated depending on the height of the contact piece.

Coating thickness is the shortest distance between the coating surface at a given point and the base metal surface. As a technological characteristic, the thickness affects such an important performance property as the strength of the bond with the base metal. Increasing the thickness of the coating above the optimum leads not only to a deterioration in quality (decrease in bond strength), but also to economic costs.

The coating was applied to a given area due to the linear movement of the spray device in combination with either the transverse displacement of the spray device or contact piece. With a single linear movement of the spray device, the sprayed material forms a uniform coating layer, the cross-section of which is described by the Gaussian curve. The requirements for the thickness of the sprayed layer are indicated in the technological documentation, based on the uniformity of the distribution of the coating thickness on the contact surface. The required thickness of the sprayed coating was determined based on the thickness of the working layer, the tolerance for subsequent processing and the tolerance for the dimensions of the contact piece and the thickness of the sprayed layer. The thickness of the sprayed coating on the contacts, in which the lost dimensions are restored, provided for a tolerance for their following processing: turning and grinding. As a result, the thicknesses of the sprayed coatings of the contacts and the tolerances for their machining were calculated depending on the height of the contact piece (the number of switching cycles of the sprayed contact pieces).

In thermal spraying of coatings, the build-up of parts occurs at a relatively high rate, that is, approximately 10 - 20 times faster than electrolytic deposition of steel and approximately 100 - 200 times faster than electrolytic chromium plating.

Key words: ***coating thickness, gas-plasma spraying, contact material, density, porosity, hardness, thickness gauge, effective efficiency, microsection***