УДК 621.3.066.5/6:636 DOI 10.31548/energiya2019.06.146

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ, ЩО НАНЕСЕНІ ГАЗОПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ

В. В. Коробський, кандидат технічних наук, доцент

А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

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

Анотація. *Виявлено закономірності фізико-механічних процесів, які відбуваються при напилюванні поверхні відновлених контактних вузлів електромагнітних пускачів; досліджено залежності якості та товщини покриття, а також кількості перенесеного матеріалу від електричних характеристик технологічного процесу газоплазмового напилювання. Встановлені закономірності формування покриття з високими механічними властивостями на контакт-деталях.*

Зазначено, що відновлення контактів комутаційних апаратів нанесенням покриттів зношеного робочого шару газоплазмовим напилюванням - найбільш простий, економічно-доцільний спосіб відновлення.

Для відновлення робочого шару контактів електромагнітних пускачів ПМЛ-1200-О4 пропонуються дослідні контактні матеріали на основі міді та срібла. Для порівняння фізико-механічних властивостей були взяті матеріали: мідь, латунь, алюміній, матеріал СОК15. Визначалися в процесі дослідження такі фізико-механічних властивості: твердість при комутаційних випробуваннях, густина напилених матеріалів, пористість газоплазмового покриття, міцність на втому напилених матеріалів, визначення товщини покриттів. Природно, що всі наведені фізико-механічні властивості напиленого матеріалу обумовлюються технологічними параметрами режиму напилювання, які суттєво впливають на радіус розсіювання матеріалу, який 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. Нанесення покриття на задану площу відбувалося за рахунок лінійного переміщення плазмотрону в поєднанні або з поперечним зміщенням плазмотрону, або контакт-деталі.

Специфічний механізм утворення покриттів з напилених матеріалів і складність виготовлення експериментальних зразків 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.

Ключові слова: ***газоплазмове напилювання, контактний матеріал, густина, пористість, твердість, випробування на втому, товщина покриття, електроерозійне зношування***

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.

Цікавість до технічних можливостей газотермічного нанесення покриттів пояснюється, перш за все, тими перевагами, які дають плазмові покриття при відновленні робочої поверхні, зокрема контактів. Плазмова технологія відкрила нові шляхи отримання високомодульних і високоміцних композиційних матеріалів, що армовані волокнами (матрицею) і застосовуються для захисту від нагрівання, корозії, ерозійного впливу високотемпераутрних газових потоків, підвищення зносо- і жаростійкості тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування газоплазмового напилення в електротехніці пов’язано, з однієї сторони, з покращенням експлуатаційних характеристик електричних апаратів за рахунок застосування покриттів контактів зі спеціальними ерозієстійкими характеристиками, а з іншої сторони, - з підвищенням надійності самого апарату та всього електроустаткування.

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].

Мета дослідження – встановити залежності фізико-механічних властивостей поверхні контактування (перенесеного матеріалу), нанесеного газоплазмовим напилюванням, при погодженні часових параметрів технологічного процесу відновлення, які б дозволили підвищити ефективність і експлуатаційну надійність комутаційних апаратів завдяки застосуванню в них економічно доцільних композиційних контактних матеріалів на основі міді та срібла.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення досліджень використовувалися контактні матеріали, якими відновлені контакт-деталі пускача ПМЛ-1200-О4. Матеріали виготовлені на основі міді та срібла з домішками металів та інших термодинамічно стійких з'єднань [2]:

1) 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni [3].

2) 94,5%Ag+2,0%Co_2O_3++2,0%C+1,5%Y_2O_3 [4].

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. Обробка експериментальних даних електроерозійних досліджень відновлених контактів проведена за методикою, що викладена в [5].

У процесі проведення досліджень використовувалися різні технологічні процеси напилювання, металографічні та спектральні 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.

Густина напилених матеріалів визначається методом гідростатичного зважування зразків у дистильованій воді. За кінцеві результати приймається середня величина не менше п'яти зважувань з похибкою, яка не перевищувала 3 %. Формула для визначення густини γ напилених матеріалів:

$$\gamma = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \gamma_B \,, \qquad (1)$$

де m_1 – маса контакту, зваженого в повітрі, г; m_2 – уявна маса контакту, зваженого у воді, г; γ_B – густина води, г/см^3, (10^3 кг/м^3).

Зважування контактів проводиться на механічних вагах ВЛА-200М, які забезпечують точність зважування не менше 10^{-4} г. Повторність зважування складала не менше трьох разів і за кінцевий результат приймається середнє арифметичне значення.

Твердість відновлених контакт-деталей з різних матеріалів визначали з допомогою приладу ПМТ-3 металографічним методом. Дослідження проводили на трьох зразках кожного матеріалу. На кожному зразку здійснюється не менше п'яти замірів. Відносна похибка вимірювань $\pm$ 10 %. Для полегшення визначення числових значень мікротвердості при різних навантаженнях користувалися спеціальними таблицями. Діапазон застосовуваних навантажень 0,049 - 4,905 Н.

Результати досліджень та їх обговорення.

1. Визначення твердості при комутаційних випробуваннях.

Твердість оцінюється опором, що одне тіло робить проникненню в нього іншого, більш твердого тіла. Ця характеристика відбиває цілий комплекс механічних властивостей. Випробування на твердість матеріалів з покриттями проводиться для контролю якості нанесеного шару, виявлення змін у поверхневих ділянках основного металу, для оцінки структурної неоднорідності по перерізу покриття, з метою дослідження закономірностей зношування покриттів, визначення міцності з'єднання покриття з основним металом тощо.

Сутність методу вимірювання твердості за Роквелом (найбільш поширений, доступний та оперативний) полягає в тому, що у випробувану поверхню вдавлюється алмазний конус чи сталева кулька. Безрозмірною одиницею твердості є величина, що відповідає переміщенню кінцевика на глибину $2 \cdot 10^{-3}$ мм. Переміщення фіксується індикатором годинникового типу, а значення твердості фіксуються безпосередньо на шкалі твердоміру. Діаметр кульки 1,5875 мм (1/16 дюйма), кут при вершині алмазного конуса 120° (2,1 рад). Для того, щоб усунути вплив вібрації і тонкого поверхневого шару, робиться попереднє навантаження зусиллям 100 Н (10 кгс). Потім діє основне навантаження: для шкали А - 490 Н (50 кгс), для шкали В - 883 Н (90 кгс) і для шкали З - 1472 Н (150 кгс). За різними шкалами відліку, значення твердості позначаються HRA, HRB, HRC.

Твердість за Бринелем (НВ) визначають, головним чином, у м'якого основного металу, наприклад сталі після відпалу, нормалізації, бронз, латуней тощо. Суть методу полягає в тому, що в поверхню зразка вдавлюється сталева загартована кулька діаметром 10 або 2,5 мм. Регламентується час витримки під навантаженням і

величина навантаження, причому остання підбирається таким чином, щоб її відношення до квадрата діаметра кульки було постійним. Значення твердості визначається за діаметром відбитка, що залишився на поверхні зразка після зняття навантаження.

Методом мікротвердості знаходять твердість мікрооб'ємів покриття. Основне призначення методу - дослідження твердості окремих часток, структурних складових, а також анізотропії твердості в різних ділянках покриття. Розрізняють два методи випробувань: за відновленим відбитком (основний метод) і за невідновленим відбитком (додатковий метод). Результат випробування за першим методом характеризує опір матеріалу пластичної і пружної деформації при вдавленні алмазного кінцевика статичним навантаженням протягом визначеного часу. Після зняття навантаження і видалення кінцевика вимірюють параметри відбитку, що залишився, за яким, користаючись формулами і таблицями, визначають величину мікротвердості. Найбільше поширення одержали випробування з застосуванням кінцевика у формі чотирикутної піраміди з квадратною підставкою з кутом, що складає 2,38 рад (136°). Тривалість дії навантаження не менш 3 с.

Зразками для вимірювання мікротвердості слугують металографічні шліфи. Мікротвердість покриття визначається на повздовжніх і поперечних шліфах. При використанні поперечних шліфів з покриттями дотримуються таких умов: відстань від центра відбитка до грані покриття повинна бути не меншою подвійного розміру відбитка; відстань між центрами відбитків, нанесених на поверхню покриття, повинна перевищувати розмір відбитка більш ніж у три рази.

До недоліків методу вимірювання мікротвердості варто віднести високий рівень похибки, що особливо зростає при дослідженні покриттів із застосуванням незначних навантажень. Тому діагональ відбитка була не менше 8-10 мкм.

Дані про зміну величини твердості покриттів залежно від кількості комутаційних циклів наведено в табл. 1 та табл. 3.

1. Механічні властивості металізованих покриттів до і після комутаційних випробувань (100 тис. циклів комутацій)

Метал	Тимчасовий опір, кг/см^2				Твердість за Бринелем, НВ	
	при розтягуванні		при стисканні			
	до	після	до	після	до	після
1 Мідь М1	8,2	5,4	28,4	32,0	66	64
2. Латунь Л62	3,8	5,2	18,5	20,4	50	63
3. Алюміній А99	5,4	5,0	14,2	13,1	27	26
4. Цинк Ц1	3,4	3,2	11,5	10,7	20	20
5 СОК 15: 85%Ag+15%CdO	9,1	5,7	28,2	33,0	105	110
6. 85%Cu+10%Mo+ +2%MoO_3+1%C+ +2%Ni	8,7	5,3	18,9	19,7	85	95
7. 94,5%Ag+ +2,0%Co_2O_3+ +2,0%C+1,5%Y_2O_3	8,9	6,1	26,5	34,5	95	98

2 Визначення густини напилених матеріалів.

Було проведено дослідження закономірностей зміни густини робочого шару напиленого контактного матеріалу під час комутаційних випробувань.

Кількість порожнин і їх розміри, а відповідно, і густина напиленого металу залежно від умов металізації змінюються в широких межах. У багатьох випадках пористість покриттів виключає можливість їх застосування, в інших - вона є властивістю корисною.

При витраті плазмоутворюючого газу вище оптимальних значень суттєво знижується густина покриття, зменшуються коефіцієнт витрати порошку та інші показники ефективності напилювання. Характерною особливістю металізованих покриттів, як відомо, є їх пористість і внаслідок цього більш низька, ніж у попереднього метала, об’ємна вага та густина (табл. 2). Кількість пор і їх розміри, а відповідно, і густина напиленого металу змінюється залежно від умов металізації в широких межах. Не дивлячись на зниження фізико-механічних властивостей напилених покриттів контакт-деталей пускача ПМЛ-1200-О4, їх міцність з контактотримачем при комутаційній роботі достатня, щоб переносити характерні для електричних апаратів періодичні комутаційні навантаження.

2. Густина газоплазмових покриттів різноманітних матеріалів

Метал	Густина напиленого матеріалу	
	г/см^3	% від густини порошку
1. Алюміній	2,41	90
2. Цинк	6,36	80
3. Олово	6,43	88
4. Мідь	7,53	84
5. СОК 15 (85%Ag+15%CdO)	8,91	85
6. 85%Cu+10%Mo+ +2%MoO_3+1%C+2%Ni	8,05	83
7. 94,5%Ag+2,0%Co_2O_3+ +2,0%C+1,5%Y_2O_3	8,25	88

3. Пористість газоплазмового покриття.

Наступною характеристикою якості плазмового покриття, що підлягає постійному контролю, є пористість. З однієї сторони, це – побічний показник умов напилювання; пористість може слугувати параметром оптимізації процесу, а з іншої, - вона безпосередньо впливає на ефективність захисних властивостей покриття (стійкість відновленого контакту до зношування і корозії), його тепло – і електропровідність, механічні та інші властивості.

Загальноприйнятою методикою визначення пористості є методика гідростатичного зважування (ГОСТ 18898-93). Але при цій методиці особливості структури напилених покриттів, а також незначні розміри зразків призводять до великої похибки (до 80 % і більше). У зв’язку з цим використовують модифікований варіант гідростатичного зважування, який забезпечує зниження похибки з 25-150 % до 5-20 %. Підвищення точності вимірювання досягається, головним чином, за рахунок застосування підвішування проводу діаметром 0,03-0,1 мм (мідної або платинової) і численним зважуванням зразка, що насичений рідиною, через деякі інтервали часу (15-30 с).

Пористість покриттів, їх забруднення оксидами і характер зв’язку часток одна з одного є причиною значної різниці властивостей покриттів від властивості металів до їх напилювання. Дані по визначенню густини композиційних напилених матеріалів наведено в табл. 1. Дані про зміну деяких властивостей покриттів, отриманих внаслідок газоплазмового напилювання, наводяться в табл. 3 (наведено

тільки для двох найбільш поширених композиційних матеріалів, якими відновлені контакт-деталі пускача ПМЛ-1200-О4).

4. Визначення міцності на втому напилених матеріалів.

За результатами досліджень зразків з покриттями на втому можна: відпрацьовувати технологію напилювання покриттів; вибирати оптимальне співвідношення хімічного складу, структури і властивостей матеріалів покриття й основного металу; проводити проміжний і вихідний контроль якості композиції «покриття - основний метал»; здійснювати контроль відповідальних деталей з покриттями перед експлуатацією.

Особливістю досліджень на втому матеріалів з покриттям є велика кількість факторів, що впливають на межу витривалості. Головними з них можна відзначити такі: будова покриттів і основного металу (структура, пористість, шорсткість, товщина покриття, характер з'єднання на межі розділу або наявність перехідної зони тощо); технологія виготовлення зразків (розміри і форма, наявність відсутності концентраторів напруг, спосіб нанесення покриттів, величина розподілу і знак залишкових напруг, попередня підготовка поверхні металевого зразка перед нанесенням покриття); режим навантаження (частота, період, максимальна напруга, амплітуда, коефіцієнт асиметрії циклу напруг); середовище експлуатації (наявність агресивного середовища, підвищена чи знижена температура).

Підвищення зносостійкості, поліпшення захисних властивостей і багатьох експлуатаційних характеристик покриття звичайно супроводжуються зниженням міцності зчеплення.

Модель механізму зародження тріщини в композиції «основний метал - покриття» при циклічному навантаженні заснована на припущенні, що покриття блокує дислокації в поверхневому шарі основного металу і знижує розвиток пластичної деформації. При навантаженні джерело дислокацій починає функціонувати, випускаючи дислокації. Границя «покриття - основний метал» блокує дислокації, створюючи локальні підвищення їх щільності. У мікрооб’ємі, що безпосередньо прилягає до границі, утворюється плоске скупчення граничних дислокацій, причому вони можуть знаходитися на настільки близькій відстані один

від іншого, що їх екстраплощини зливаються, викликаючи появу розтягуючих напруг $\sigma_п$. Якщо покриття достатньо крихке, то розтягуючі напруги призводять до виникнення в покритті мікротріщин, що поширюються в основний метал (рис. 1). Що стосується поверхні покриття, на якій завжди є готові концентратори напруг у вигляді порожнин, нерівномірностей, то вона відіграє роль джерела тріщин і зменшує довговічність композицій «основний метал — покриття».

3. Фізико-механічні властивості напилених покриттів

Кількість комутацій, цикл	Товщина покриття, мм	Густина, г/см^3	Твердість за Бринелем
Матеріал СОК 15 (85%Ag+15%CdO)			
0	2,5	8,91	105
100x10^3	1,8	9,12	110
200x10^3	1,1	9,18	113
300x10^3	0,6	9,22	117
Композиційний матеріал (85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni)			
0	2,5	8,64	85
100x10^3	1,5	8,63	88
200x10^3	0,9	8,65	96
300x10^3	0,4	8,66	92
Матеріал (94,5%Ag+2,0%Co_2O_3++2,0%C+1,5%Y_2O_3)			
0	2,5	8,25	95
100x10^3	1,8	8,37	98
200x10^3	1,1	8,65	101
300x10^3	0,6	9,02	105

Очевидно, залишкові внутрішні напруги, що виникають при формуванні покриття, відіграють двояку роль при виникненні і поширенні втомлених тріщин. Якщо в покритті і приповерхневих прошарках основного металу є стискаючі залишкові напруги, то вони збільшують довговічність, затримуючи зародження і поширення втомлених тріщин. При утворенні напруг розтягування (що відбувається частіше), несприятливих з погляду конструктивної міцності, руйнування зразка прискорюється завдяки посиленню напруженості стану та ініціюванню утворення тріщин.

Рис.1. Мікроструктура перехідної зони покриття з домішкою молібдену, напиленого на відполіровану поверхню контактотримача з бронзи; х920; 150 тис. циклів комутації:

1 – напилене покриття; 2 – основа (контактотримач)

Втомлені навантаження зразків з покриттями іноді супроводжується відшаровуванням покриття від основного металу. Руйнування може носити адгезійний, когезійний або змішаний характер. В окремих випадках втомлена міцність обмежується міцністю зчеплення покриття з основним металом.

Мікроскопічні дослідження поперечних шліфів, що вирізані із зон втомленого руйнування, виявили велику кількість тріщин, перпендикулярних границі покриття з основним металом. Звичайно тріщини проходять через частки і зупиняються на межі, що розділяє частки. Ця особливість характерна як для крихких покриттів, так і для пластичних.

Методика дослідів на втому, при якій реєструється тільки кількість циклів до зношення, не відповідає зростаючих вимогам практики, не дає картини поширення втомлених тріщин. Тому, все частіше проводяться дослідження з безперервною реєстрацією довжини тріщини, що розвивається.

Напилений метал відрізняється низькою пластичністю і ударною в'язкістю, в зв'язку з чим руйнування покриттів відбувається з утворенням крихкого зламу. Виникаючі в шарі напруги обумовлюють низькі механічні властивості металізованих покриттів контактів.

Під дією зусиль розтягування, згинання і скручування руйнування металізованих покриттів контактів відбувається лише після того, як буде перебільшена границя пружних деформацій основи. Подібна поведінка покриттів пояснюється тим, що напилений метал має низький модуль пружності, який наприклад, для напиленої міді дорівнює 4000 кг/мм^2 (замість 10000 кг/мм^2 для литої). Тому, навантаження, яке сприймається контактотримачем і покриттям, буде розподілятися між ними пропорційно величинам їх модулів пружності.

Таким чином, під час роботи контакту нанесене на нього покриття, завжди відчуває в декілька разів більшу напругу, ніж сам контактотримач.

5. Вимірювання, контролювання товщини покриттів.

Товщина покриття – найкоротша відстань між поверхнею покриття в даній точці і металу контактотримача. Будучи технологічною характеристикою, товщина впливає на таку важливу фізико-механічну 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. Вимоги до товщини напиленого шару завжди вказуються в технологічній документації, виходячи з рівномірності розподілу товщини покриття на поверхні контакту.

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. 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 утворював валок покриття, поперечний переріз якого описується кривою Гауса. 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 обробку залежно від комутаційних циклів напилених контакт-деталей.

Специфічний механізм утворення покриттів з напилених матеріалів (міді, алюмінію, СОК-15, 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni та 94,5%Ag+ +2,0%Co_2O_3+

+2,0%C+1,5%Y_2O_3) і складність виготовлення експериментальних зразків 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 (табл. 4).

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 мікротвердості в межах 60 - 100 HB. Загальна і відкрита пористість складає відповідно 19,7 та 9,8 %. Напруги II роду металічної матриці набагато перевищують напруги I роду і досягають 9 та 11 кГ/мм^2.

Термообробка (відпалювання у відновлювальній атмосфері) призводить до суттєвого розкислення і зміни структури мідної композиції, що обумовлюється поліпшенням властивостей (табл. 4).

4. Фізико-механічні властивості напилених покриттів

Властивості	Мідь		Алюмі-ній	СОК 15	85%Cu+10 % Mo+2%Mo O_3++1%C+2 %Ni	94,5%Ag+2,0 %Co_2O_3+2,0 %C++1,5%Y_2 O_3
	до випробу-вання	150 тис. циклів				
1. Твердість НВ, кГ/мм^2	61 - 63	42 - 44	24	105	95	98
2. Межа міцності, кГ/мм^2: - при розтягуванні - при стисканні	5,2 – 5,3 34	9,2 – 9,3 43	7,5-8,0 20 - 22	10,1-10,4 45	9,1-9,4 44	9,8-10,1 43
3. Відносна деформація, % - видовження - осадження	< 0,5 13,2	3 63	< 0,2 < 0,5	2 59	1,5 55	1,8 60
4. Модуль поздовжньої пружності, кГ/мм^2	3750	9650	1100	10520	9120	10380
5. Коефіцієнт лінійного розши-рення, град$^{-1}$·10^{-4}	0,15	0,16	0,22	0,103	0,104	0,105
6. Теплопровідність, кал/см·с·град	0,23	0,65	0,18	0,20	0,24	0,22

На рис. 2 та рис. 3 представлено залежність комутаційної зносостійкості відновлених контакт-деталей електромагнітних пускачів дослідним матеріалом на основі срібла.

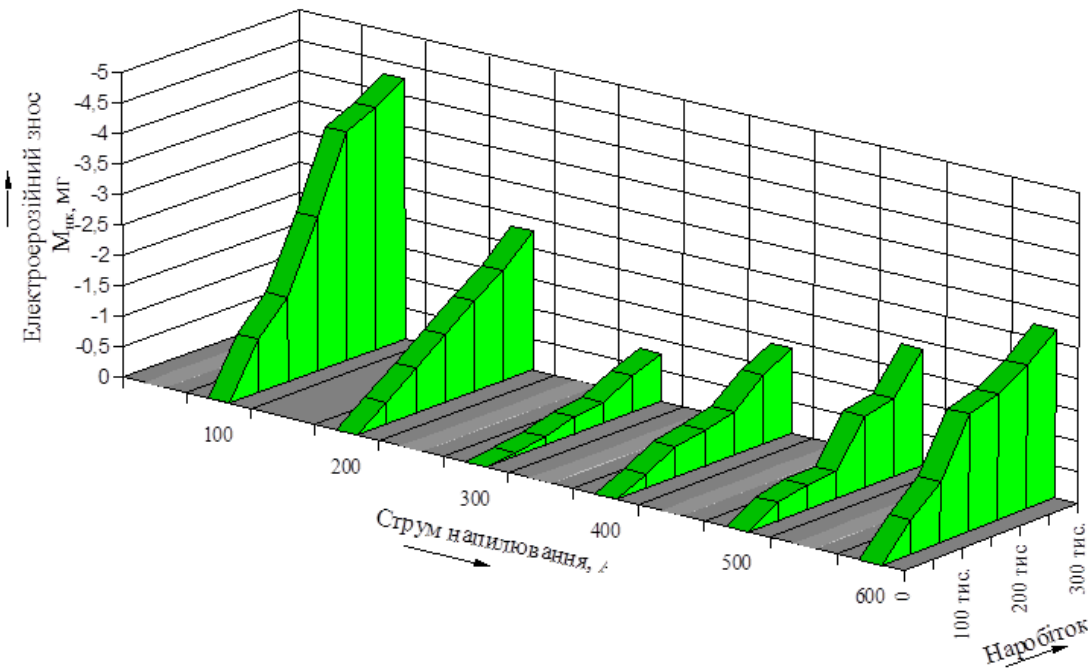

Рис. 2. Залежність електроерозійного зносу відновлених нерухомих контакт-деталей пускача ПМЛ-1200.О4. Струм комутації $I_к$=10А, струм напилювання $I_{нап}$=100, 200, 300, 400, 500, 600А. Матеріал контактів: 94,5%Ag+2,0%Co_2O_3+2,0%C+1,5%Y_2O_3.

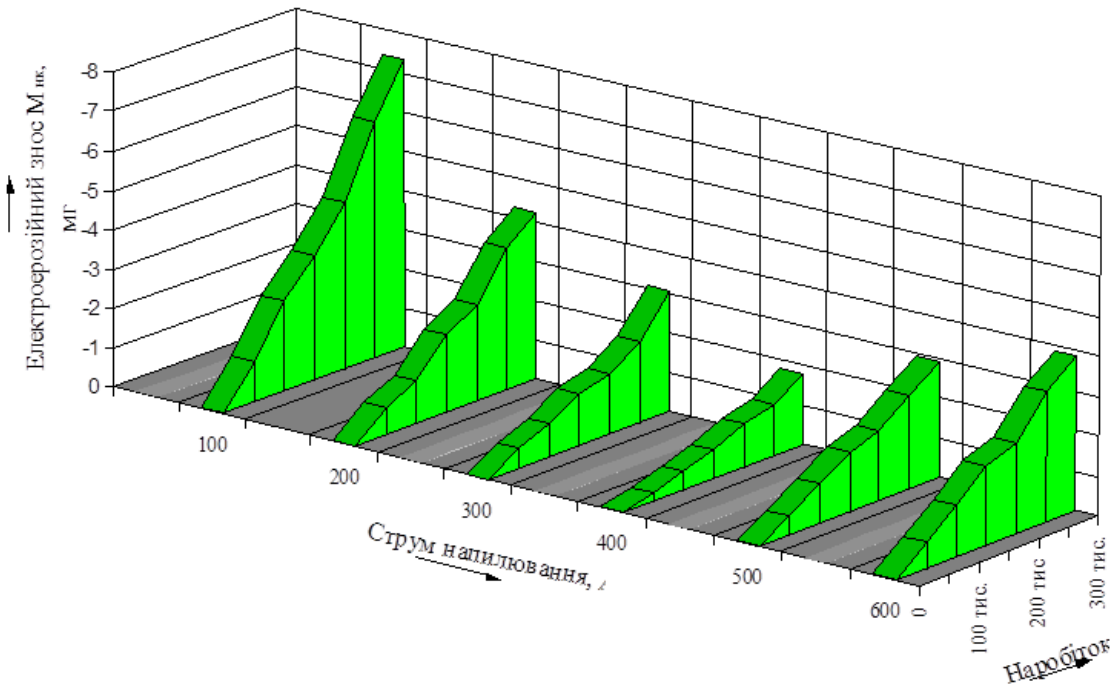

Рис.3. Залежність електроерозійного зносу відновлених рухомих контакт-деталей (мостиків) пускача ПМЛ-1200.О4. Струм комутації $I_к$=10А, струм напилювання $I_{нап}$=100, 200, 300, 400, 500, 600А. Матеріал контактів: 94,5%Ag+2,0%Co_2O_3+2,0%C+1,5%Y_2O_3.

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. Поряд з позитивними особливостями газотермічне напилювання має свої обмеження в застосуванні. До недоліків відносять малу міцність зчеплення покриття з основним металом і незначну механічну міцність. Але за рахунок зміни технологічних параметрів напилювання подібні недоліки можна усувати.

3. Не дивлячись на низькі механічні властивості напилених покриттів, їх міцність при сумісній роботі достатня, щоб відновлені контакти пускачів витримали комутаційний ресурс в 300 тис. циклів комутації.

4. Для газоплазмового напилювання створені композиційні контактні матеріали, що виготовляється методами порошкової металургії наступного складу: 85%Cu+10%Mo+2%MoO_3+1%C+2%Ni та 94,5%Ag+2,0%Co_2O_3+2,0%C+ 1,5%Y_2O_3 .

Список літератури

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. Korobskyi V. V. New aspects of creation of environmentally friendly composite materials for contact systems of electric equipment in the agriculture sector: 2018. 11 th International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11) / V.V.Korobskyi, A.M.Mrachkovskyi // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – Ivano–Frankivsk (Ukraine), May 21-25, 2018, – P. 35.

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. Пат. №2026580 РФ, МКИ^6 Н 01 Н 1/02, С 22 С 5/06, 1/05. Спечений матеріал на основі срібла для електричних контактів / С.П.Коханівський, Г.М.Братерська, Т.О.Донцова, В.А.Наливайко, В.В.Коробський, В.В.Гриневич, В.Є.Косматий (Україна); УГАУ. - №5029742/02; Заявл. 08.07.91; Опубл. 10.01.95, Бюл. №1. - 3 с.

5. Коробський В.В. Експериментальні дослідження ерозійного зносу серійних контакт-деталей пускачів як функція кількості комутацій / В.В.Коробський // Наук. вісн. НУБІП України. Серія "Техніка та енергетика в АПК". – 2013. – Вип. №184, ч. 1. – С. 181 – 187.

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. (2018). New aspects of creation of environmentally friendly composite materials for contact systems of electric equipment in the agriculture sector: 11 th International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11). Molecular Crystals and Liquid Crystals. Ivano–Frankivsk (Ukraine), 35.

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. Kochanovskiy, S. P., Braterskaya, G. M., Dontsova, T. O., Nalyvayko, V. A., Korobskiy, V. V., Grinevich, V. V. Spechenyi material na osnovi sribla dlia elektrychnykh kontaktiv [Baked silver-based material for electrical contacts]. Patent No. 2026580 of the Russian Federation, MKI6 N 01 N 1/02, C 22 C 5/06, 1/05. The applicant of the UGAU. – No. 5029742/02; stated. July 8, 1991; has published January 10, 1995, Bul. No. 1, 1995.

5. Korobskiy, V. V. (2013). Eksperymentalni doslidzhennia eroziinoho znosu seriinykh kontakt-detalei puskachiv yak funktsiia kilkosti komutatsii. [Experimental researches of erosion wear of serial contact parts of starters as a function of the quantity of commutation]. Nauk. visn. NUBIP Ukrainy. Seriia "Tekhnika ta enerhetyka v APK", 184 (1), 181 – 187.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ, КОТОРЫЕ НАНЕСЕНЫ ГАЗОПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

В. В. Коробский, А. М.Мрачковский

Аннотация. *Выявлены закономерности физико-механических процессов, происходящих при напылении поверхности восстановленных контактных узлов электромагнитных пускателей; исследованы зависимости качества и толщины покрытия, а также количества перенесенного материала от электрических характеристик технологического процесса газоплазменного напыления. Установлены закономерности формирования покрытия с высокими механическими свойствами на контакт-деталях.*

Отмечено, что восстановление контактов коммутационных аппаратов нанесением покрытий изношенного рабочего слоя газоплазменным напылением - наиболее простой, экономически целесообразный способ восстановления.

Для восстановления рабочего слоя контактов электромагнитных пускателей ПМЛ-1200-О4 предлагаются исследовательские контактные материалы на основе меди и серебра. Для сравнения физико-механических свойств были взяты материалы: медь, латунь, алюминий, материал СОК15. Определялись в процессе

исследования следующие физико-механических свойствах: твердость при коммутационных испытаниях, плотность напыленных материалов, пористость газоплазменного покрытия, прочность на усталость напыленных материалов, определение толщины покрытий. Естественно, что все приведенные физико-механические свойства напыленного материала обуславливаются технологическими параметрами режима напыления, которые существенно влияют на радиус рассеивания материала, который зависит от конструкции плазмотрона (диаметра анода, способа газовой стабилизации и т.д.) и режима напыления (электрической мощности, состава и расхода плазмообразующего газа, расстояния напыления). Как правило, его значение находится в диапазоне 4 - 8 мм. Нанесение покрытия на заданную площадь происходило за счет линейного перемещения плазмотрона в сочетании либо с поперечным смещением плазмотрона или контакт-детали.

Специфический механизм образования покрытий из напыленных материалов и сложности изготовления экспериментальных образцов определили необходимость проведения специальных исследований свойств напыленных покрытий: прочности при растяжении и сжатии, упругих характеристик напряженного состояния, теплового расширения и теплопроводности и коммутационной износостойкости восстановленных контактов.

Ключевые слова: ***газоплазменное напыление, контактный материал, плотность, пористость, твердость, испытания на усталость, толщина покрытия, электроэрозионный износ***

RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES CONTACT MATERIALS OF ELECTROMAGNETIC STARTERS WHICH ARE APPLIED BY A GAS-PLASMA METHOD

V. Korobsky, A. Mrachkovskyi

Abstract. *The laws of physical and mechanical processes occurring during the deposition of the surface of the restored contact nodes of electromagnetic starters are revealed; The dependences of the quality and thickness of the coating, as well as the amount of transferred material on the electrical characteristics of the gas-plasma spraying technological process, are investigated. The patterns of coating formation with high mechanical properties on contact parts are established.*

It is noted that the restoration of contacts of switching devices by coating the worn working layer by gas-plasma spraying is the most simple, economically feasible method of recovery.

To restore the working layer of the contacts of the PML-1200.O4 electromagnetic starters, research contact materials based on copper and silver are offered. To compare the physicomechanical properties, the following materials were taken: copper, brass, aluminum, and COK15 material. During the study, the following physical and mechanical properties were determined: hardness during switching tests, density of sprayed materials, porosity of a gas-plasma coating, fatigue strength of sprayed materials, determination of coating thickness. Naturally, all the physicomechanical properties of the sprayed material are determined by the technological parameters of the spraying mode, which significantly affect the scattering radius of the material, which depends on the plasma torch design

(anode diameter, gas stabilization method, etc.) and spraying mode (electric power, composition and flow rate of plasma-forming gas, spraying distance). As a rule, its value is in the range of 4 - 8 mm. The coating over a given area occurred due to the linear movement of the plasma torch in combination with either the transverse displacement of the plasma torch or the contact part.

The specific mechanism of the formation of coatings from sprayed materials and the difficulty of manufacturing experimental samples determined the need for special studies of the properties of sprayed coatings: tensile and compressive strength, elastic characteristics of the stress state, thermal expansion and thermal conductivity, and switching wear resistance of restored contacts.

Key words: ***gas-plasma spraying, contact material, density, porosity, hardness, fatigue tests, coating thickness, electroerosive wear***