

УДК 621.31

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗНОШЕНІ ДЕТАЛІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Радько І.П., к.т.н.

Мархонь М.В., асистент

Національний університет біоресурсів і природокористування

Тел.: 067-661-57-44

**Анотація** - розглянуто питання дослідження контактних матеріалів при відновленні контактних вузлів електричних апаратів на твердість, утомленість та проникність.

**Ключові слова:** контакт, електричний апарат, напилення, твердість, втомленість, проникність.

*Постановка проблеми.* Існує проблема відновлення контактних вузлів комутаційних апаратів. Способи відновлення застосовуються різні. Після напилення контактних матеріалів необхідно провести дослідження на міцність зчеплення контактних матеріалів з зношеними деталями електрообладнання.

*Формулювання цілей статті.* Дослідити міцність зчеплення контактних матеріалів на зношенні деталі контактних вузлів.

*Основні матеріали дослідження.* Для визначення міцності зчеплення контактних матеріалів до основи при відновленні контактів необхідно визначити твердість, втомність та проникність.

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. Дані про твердість широко використовуються завдяки ряду переваг цього методу: можливість 100%-го контролю деталей після нанесення покриття, випробування не є руйнуючими, виміри можна робити безпосередньо на контакт-деталі; серійні прилади не складні побудовою, продуктивні і зручні в експлуатації.

Існують стандарти, що регламентують вимірювання твердості [1]. Стандарт визначає параметри і межі допустимої похибки стаціонарних твердомірів, що випускаються вітчизняною промисловістю.

Метод вимірювання твердості по Роквелу завдяки простоті й оперативності вважається одним з найпоширеніших. Сутність його 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 твердоміра. Діаметр кульки 1,5875 мм (1/16 дюйма), кут при вершині алмазного конуса  $120^\circ$  (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 С — 1472 Н (150 кгс). По різних шкалах відліку значення твердості позначаються HRA, HRB, HRC.

Твердість за Бринелем (HB) визначають, головним чином, у м'якого основного металу: 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.

Відповідно до стандарту [1], вимірювання твердості по Віккерсу проводяться при навантаженнях від 9,8 Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс). За схемою навантаження метод нагадує вимір твердості по Бринелю, тільки індентором виступає чотирикутна алмазна піраміда з кутом між протилежними гранями  $2,38$  рад ( $136^\circ$ ). Числове значення твердості по Віккерсу (HV) визначають по довжині діагоналі відбитка, використовуючи спеціальні таблиці. При вимірі твердості необхідно, щоб мінімальна товщина покриття була більше діагоналі відбитка в 1,2 рази. Методом Віккерса можна вимірювати твердість поверхневих шарів покриття товщиною до 0,03—0,5 мм.

Розмірність значень твердості, визначених по методу Бринеля чи Віккерса, однакова — Па (МПа) (кгс/мм<sup>2</sup>); крім того, для матеріалів із твердістю до HB 450 числа твердості збігаються. Метод звичайно застосовують для матеріалів, у яких HB > 360, тобто для термозміцнених сталей, зносостійких покриттів тощо. З усіх методів виміру твердості розглянутий найбільш досконалий, тому що дозволяє одержувати чисельні значення практично для будь-яких матеріалів і в будь-яких інтервалах твердості.

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 іспитів: по відновленому відбитку (основний метод) і по невідновленому відбитку (додатковий метод) [3, 6]. Результат іспиту за першим методом характеризує опір матеріалу пластичної і пружної деформації при вдавненні алмазного наконечника статичним навантаженням протягом визначеного часу. Після зняття навантаження і видалення наконечника вимірюють параметри відбитка, 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 ( $136^\circ$ ). Тривалість дії навантаження повинна бути не менш  $3$  с. Шорсткість робочої поверхні (площина шліфа)  $R_a \leq 0,32$  мкм. Значення мікротвердості  $H$  у цьому випадку обчислюють за формулою:

$$H=1,854 \cdot P/d^2,$$

де  $P$  - нормальне навантаження, що прикладене до алмазного кінцевика;

$d$  - середнє арифметичне довжин обох діагоналей квадратного відбитка.

Для полегшення визначення числових значень мікротвердості при різних навантаженнях складені спеціальні таблиці. Діапазон застосовуваних навантажень  $0,049$ — $4,905$  Н.

Зразками для вимірів мікротвердості служать металографічні шліфи. Мікротвердість покриття можна визначати на повздовжніх і поперечних шліфах. При використанні поперечних шліфів з покриттями слід дотримуватися наступних умов: відстань від центра відбитка до грані покриття повинно бути не менш подвійного розміру відбитка; відстань між центрами відбитків нанесених на поверхню покриття, повинне перевищувати розмір відбитка більш ніж у три рази. У дослідницькій практиці для визначення мікротвердості покриттів найчастіше використовується прилад марки ПМТ-3.

До недоліків методу виміру мікротвердості варто віднести високий рівень похибки, що особливо зростає при дослідженні покриттів із застосуванням малих навантажень. Тому бажано, щоб діагональ відбитка була не менше  $8$ — $10$  мкм. Величина похибки залежить від ідентичності навантаження, вибору оптимального навантаження, якості налаштування систем приладу й інших причин.

Оцінка втомленої міцності. Під терміном «втома» розуміють процес поступового нагромадження пошкоджень матеріалу під дією змінних напруг, що призводить до зміни властивостей, утворенню і розвитку тріщин і руйнуванню [3].

Втома залишається однією з найважливіших проблем машинобудування, тому що більш 80% руйнувань деталей і конструкцій носять характер втоми.

За результатами досліджень зразків з покриттями на втому можна: відпрацювати технологію напилювання покриттів; вибрати оптимальне сполучення хімічного складу, структури і властивостей матеріалів покриття й основного металу; розраховувати і проектувати конструкції; 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 наступні: 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 тощо); режим навантаження (частота, період, максимальна напруга, амплітуда, коефіцієнт асиметрії циклу напруг тощо); середовище експлуатації (наявність агресивного середовища, підвищена чи знижена температура тощо).

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

Модель механізму зародження тріщини в композиції «основний метал - покриття» при циклічному навантаженні запропонована в роботах [4]. Схема 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 одного, що їх екстраплощини зливаються, викликаючи появу розтягуючих напруг  $\sigma_p$ . Якщо покриття достатнє крихке, то розтягуючі напруги призводять до виникнення в покритті мікротріщин, що поширюються в основний метал.

Відповідно до іншої схеми, поява і поширення тріщин може відбуватися безпосередньо від поверхні покриття. Відомо, що навіть на гладких зразках при циклічному напруженні тріщини з'являються насамперед на поверхні. Що стосується поверхні покриття, на якій зав-

жди є готові концентратори напруг у вигляді порожнин, нерівномірностей, то вона відіграє роль джерела тріщин і зменшує довговічність композицій «основний метал — покриття».

Очевидно, залишкові внутрішні напруження, що виникають при формуванні покриття, відіграють двояку роль при виникненні і поширенні втомлених тріщин. Якщо в покритті і приповерхневих шарах 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.

Отримано результати, які показують зв'язок довговічності газоплазмових покриттів з карбїду титана з розподілом залишкових напруг по товщині покриття. У поверхневому шарі покриття значні напруги розтягування призводять до відшарування покриття вже в початковий період навантаження. Залишкові напруги стиску, які виявлені в центральній частині шару і досягають 450 МПа, змінюють характер тріщиноутворення, переносячи осередки зародження тріщини під покриття.

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.

Експерименти проводилися на спеціальній установці, що складається з двох пристроїв. Один з них призначений для визначення довговічності, а інший - для дослідження закономірностей зародження і поширення втомлених тріщин. Дослідження проводилися за такою методикою. На стандартні зразки наноситься покриття й оцінюється його вплив на опір втоми в порівнянні з контрольними зразками. Розміри гладких зразків круглого і прямокутного перерізу, застосовуваних для утомлених дослідів, стандартизовані. Виготовляються типові машини для дослідів по різних схемах навантаження: чистий і консольний вигин обертового зразка, вигин плоских зразків, розтягання – стиск, скручування. Стандарт [5] визначає характеристики механічних, електромеханічних і гідравлічних машин. Нормуються наступні

параметри: найбільше сумарне навантаження, найбільша амплітуда навантаження, частота циклів комутації апаратів. Дослідження плоских контактів з покриттями проводяться на комбінованих експериментальних установках, що дозволяють визначати границю витривалості, будувати криві малоциклічної втоми, спостерігати за процесом зародження тріщини в покритті від задалегідь створеного концентратора напруги, визначати кінетику поширення тріщини в покритті та в основному металі.

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

Виникаючі в шарі напруги обумовлюють низькі механічні властивості металізованих покриттів. Як видно з даних табл. 1, на міцність покриттів мало впливає спосіб нанесення (електродуговий або газоплазмовий).

Таблиця 1 - Механічні властивості металізованих покриттів

Метал	Тимчасовий опір, кг/см <sup>2</sup>				Твердість по Бринелю	
	при розтягуванні		при стисканні		ЭМ-3	ГИМ
	ЭМ-3	ГИМ	ЭМ-3	ГИМ		
Мідь МІ	8,2	5,4	28,4	32,0	66	64
Латунь Л62	3,8	5,2	18,5	20,4	50	63
Алюміній А99	5,4	5,0	14,2	13,1	27	26
Цинк Ц1	3,4	3,2	11,5	10,7	20	20
85%Ag+15%CdO	9,1	5,7	28,2	33,0	88	105
85%Cu+10%Mo+ +2%MoO <sub>3</sub> +1%С+2%Ni	8,7	5,3	18,9	19,7	95	85

Напилений метал відрізняється низькою пластичністю і ударною в'язкістю, в зв'язку з чим руйнування покриттів відбувається з утворенням крихкого зламу.

Не дивлячись на низькі механічні властивості напилених покриттів, їх міцність при сумісній роботі достатня, щоб відновлені контакти витримали комутаційний ресурс в 300 тис. циклів комутації. Під дією зусиль розтягування, згинання і скручування руйнування металізованих покриттів контактів відбувається лише після того, як буде перебілена границя пружних деформацій основи. Така поведінка покриттів пояснюється тим, що напилений метал має низький модуль пружності, котрий наприклад, для напиленої міді дорівнює 4000 кг/мм<sup>2</sup>

(замість 10000 кг/мм<sup>2</sup> 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 більшу напругу, ніж сам контактотримач.

Характерною особливістю металізованих покриттів, як вже відмічалось вище, є їх пористість і внаслідок цього більш низька, ніж у попереднього метала, густина (табл. 2).

Таблиця 2 - Густина газоплазмових покриттів різноманітних матеріалів

Метал	Густина напиленого металу	
	г/см <sup>3</sup>	% 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)	8,11	85
6. 85%Cu+10%Mo+ +2%MoO <sub>3</sub> +1 %C+2%Ni	8,05	83

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

Пористість покриттів, їх забруднення оксидами і характер зв'язку часток одна з одного є причиною значної різниці властивостей покриттів від властивості металів до їх напилення. Дані про зміну деяких властивостей покриттів, отриманих внаслідок газоплазмового напилювання, наводяться в табл. 3.

**Оцінка проникності.** Проникність - це здатність матеріалу пропускати крізь себе рідини та газу. Особливо важливо знати проникність для захисних покриттів, що працюють в агресивному середовищі при високій температурі. Числовими критеріями проникності є коефіцієнти проникності  $K_p$  і фільтрації  $K_f$ . Проникність збільшується зі збільшенням пористості, а також залежить від перепаду напруг у зразку, товщини та анізотропії покриття.

Звичайно спостерігається гарна кореляція між значеннями пористості та проникністю. Це може бути використано, для виявлення мікротріщин покриття. При аналізі плазмових та окисних покриттів було знайдено, що газопроникність на порядок або більше перевищує значення їх відкритої пористості. В результаті мікроскопічних досліджень покриттів зафіксували наявність мікротріщин, які збільшуючи

пористість різко підвищують газопроникність. Проникності покриттів, отриманих різними методами, можуть відрізнятися на п'ять порядків, але навіть найбільш міцні газоплазмові покриття не зможуть надійно захистити від корозії в особливо агресивних середовищах [6,7,8.].

Таблиця 3 - Деякі фізичні властивості напилених металів

Метал	Теплоємність (при 15°C), ккал/кг · град		Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , кал/м <sup>2</sup> град	
	Напиленого	Литого	Напиленого	Литого
Цинк	0,082	0,092	60,0	95,0
Алюміній	0,193	0,214	31,0	123,0
Латунь	—	—	12,0	73,5
СОК-15 (85%Ag+15%CdO)	0,213	—	20,0	—
85 %Cu+10 %Mo+ +2%MoO <sub>3</sub> +1%C+ 2%Ni	0,028	—	24,0	—
Метал	Коефіцієнт теплового розширення $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> мм/мм °C		Питомий опір $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	
	Напиленого	Литого	Напиленого	Литого
Цинк	12,4	32,0	0,142	0,06
Алюміній	12,1	23,7	0,295	0,029
Латунь	11,8	17,2	0,817	0,07
СОК-15 (85%Ag+15%CdO)	10,3	-	0,28	-
85 %Cu+10 %Mo+ +2%MoO <sub>3</sub> +1%C+ 2%Ni	10,4	-	0,32	-

*Висновки.* Проведеними експериментальними дослідженнями відновлення контактних вузлів встановлено, що отриманні локальні покриття з різноманітних контактних матеріалів характеризуються високою міцністю та електроерозійною стійкістю. Твердість матеріалів з покриттям, утомленість та проникність дозволяють стверджувати, що відновленні контакти витримують комутаційний рух в 300 тисяч циклів комутацій. Тривалість роботи електричного апарату продовжується. Підвищується економічна ефективність.

*Список використаних джерел*

- ГОСТ 2999-75. Металы. Метод определения твердости по Викерсу.
- ДСТУ 2846-94. Контактори електромагнітні низьковольтні.



3. ISO 2740.-86. Матеріали металеві спечені. Зразки для випробування.
4. *Кади́ров В.Х.* Високоенергетические процессы газоплазменного напыления / *В.Х. Кади́ров.* – К: ИПМ, 1995-52ст.
5. ISO 4498-90. Матеріали металеві спечені. Визначення уявної твердості матеріалів в основному з рівномірною твердістю у перерізі.
6. *Коханівський С.П. Наливайко В.А. Коробський В.В.* Вплив хімічного середовища на роботу комутаційних апаратів. Тези науково-практичної конференції «проблеми АПК: пошук, досягнення». К: УДАУ, 1993р.
7. *Радько І.П.* Дослідження мікроструктури робочих поверхонь відновлених контакт-деталей після випробування на їх електроерозійну стійкість. Журнал «Энергосбережение. Энергетика, энергоаудит». Харьков. №1. 2012р.
8. *Радько І.П.* Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні дослідних контактів при комутації змінного струму, відновлених методом газоплазмового напилення. Журнал «енергетика і автоматика» НУБіП України №2. Київ 2012р.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОШЕННЫЕ ДЕТАЛИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Радько І.П., Мархонь М.В.

*Аннотация* - рассмотрено вопрос исследования контактных материалов после восстановления контактных узлов энергетических аппаратов на твердость, утомленность и проникновения.

## **RESEARCH ADHESION STRENGTH COMPOSITE CONTACT MATERIALS ON THE WORN PARTS ELECTRIC**

I. Radko, M. Markhon

### *Summary*

**The issue of studying contact materials after restoration of contact nodes of electrical apparatus for hardness, weariness and permeability was considered.**