

УДК 621.762:621.315.5

© В. О. Кохановський, к.т.н., доцент, НТУУ «КПІ», Київ,
Україна

**ВИЗНАЧАЛЬНІ ФАКТОРИ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНТАКТІВ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ**

У статті узагальнено та систематизовано фактори, які впливають на зносостійкість і функціональність контактів комутаційних апаратів. Для цього було проаналізовано види зносу, яким піддається електричний апарат під час експлуатації та визначено властивості контактної матеріалу — механічні, фізичні, хімічні, структурні, які зменшують переважаючий вид зносу залежно від режимів роботи і умов експлуатації апарату. Також наведено перелік параметрів комутуючого кола і пристроїв електричних апаратів, які впливають на процеси зношення матеріалу контактів та загальні положення щодо вибору типу матеріалу, якими необхідно керуватися при розробці контактної системи для електромеханічних комутаційних апаратів.

Ключові слова: електричні контакти, комутаційні апарати, зносостійкість, контактні матеріали, експлуатаційні характеристики, властивості матеріалів.

Постановка проблеми

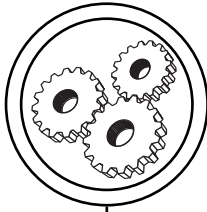
Надійна робота електромеханічного комутаційного апарату залежить перш за все від безвідмовної роботи його контактної системи. Контакти в процесі експлуатації піддаються впливу численних факторів, внаслідок чого можуть відбуватися неналежне функціонування апарату, передчасне зношення контактів, порушення електропровідності та інші негативні явища. Тому, визначення шляхів, які залежно від умов та режимів роботи, можуть забезпечити стабільність функціонування та необхідний ресурс служби є важливою задачею при розробці контактних систем комутаційних апаратів.

Мета роботи

Одним із напрямків удосконалення конструкції електричного апарату є розробка контактної матеріалу з тими властивостями, які необхідні для належного функціонування при визначених умовах експлуатації. Визначення переліку таких властивостей, які зменшують негативний вплив експлуатаційних факторів і є метою даної роботи.

Основні вимоги до контактів електромеханічних комутаційних апаратів

Комутуючі пристрої електричних апаратів під час експлуатації зазнають впливу наступних факторів, які призводять до таких руйнувань [1]:



- механічний знос;
- дугова електрична ерозія;
- місткова електрична ерозія;
- корозія під впливом навколишнього середовища;
- дугова корозія;
- теплове зварювання.

Відповідно до різновидності зносу контактів постає питання перед контактним матеріалом (КМ) щодо експлуатаційних вимог, залежно від того, який вид руйнування переважає в даних конкретних умовах експлуатації (табл.).

При механічному зношуванні контакти стираються, розтріскуються, деформуються і нагріваються під дією кінетичної енергії при їх замиканні. У цьому випадку КМ повинен мати високі механічні властивості: твердість, граничну міцність при ударі, тиску і зсуві, помірний модуль пружності та пластичність, низький коефіцієнт тертя.

Контакти, які працюють при номінальних струмах 40–100 А, зазнають руйнування та ерозії в результаті впливу електричної дуги. При цьому для зменшення ерозії контакти повинні мати наступні властивості: високу температуру плавлення і кипіння, електро- і теплопровідність, високе критичне значення напруги і струму для створення дуги, високу твердість, низьку пружність парів металу при температурі дуги, мати високий поверхневий натяг та кут змочування металу в рідкому стані наблизений до нуля, мікродисперсну структуру композиції [2].

Корозія робочих поверхонь контактів пускатрів, яка відбувається під дією хімічноактив-

них домішок середовища, також є одним із головних факторів зносу і відмов, тому основні властивості для зменшення цього впливу є такі:

- високий електродний потенціал матеріалу;
- низька хімічна спорідненість матеріалу до кисню, азоту, вуглецю;
- низька термічна стійкість ізоляційних плівок;
- висока пружність дисоціації продуктів корозії при температурі електричної дуги;
- низька електрична та механічна міцність ізоляційних плівок;
- структура плівок [3].

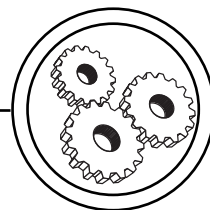
На частоту і силу зварювання впливають такі властивості контактних матеріалів [4]:

- температура плавлення;
- електро- і теплопровідність;
- твердість;
- властивість до окиснення робочих поверхонь контактів;
- мікроструктура матеріалу [5].

Складні умови експлуатації контактів та чисельні фактори — електричні, механічні та хімічні, які впливають на роботу контактів, затрудняють вибір контактного матеріалу.

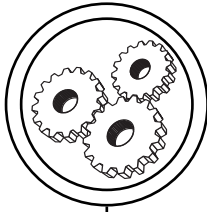
Рід і величина струму, напруга, характер навантаження — омичний, індуктивний, ємнісний, контактний тиск, контактний розхил, швидкість і частота ввімкнень, склад, вологість і температура середовища, у якому знаходяться контакти, та багато інших факторів впливають на поведінку контактів в експлуатації.

Один і той же матеріал, стійкий до зносу за одних умов, при



Властивості контактного матеріалу,
які зменшують переважаючий вид зносу

Вид зносу	Зовнішні фактори, які викликають знос	У чому виражається знос	Властивості матеріалу контактів, які впливають на знос
Механічний	Контактний натиск. Кінетична енергія удару контактів при замиканні. Проковзування при замиканні	Розплющування, розтріскування, стирання контактів	<u>Високі механічні властивості</u> : твердість, гранична міцність при ударі, тиску і зсуві, <u>помірний</u> модуль пружності, густини та пластичності, <u>низький</u> коефіцієнт тертя. Постійність властивостей до 300 °С. Мікроструктура матеріалу.
Ерозія: а) місткова б) дугова та іскрова	Плавлення контактних точок струмом. Щільність струму Енергія дуги(іскри). Вид струму. Індуктивність та ємність кола	Голкоутворення на аноді. Зчеплення контактів. Плавлення, випаровування, розбризкування металу. Перенос металу. Кратер та нарости на контактах. Знос та деформація контактів	<u>Високі електрофізичні властивості</u> : Напруга і струм дугоутворення. Температура кипіння, плавлення та сублимації. Скрита теплота плавлення та випаровування. Електро- та теплопровідність. Робота виходу електрона з кристалічної ґратки. Потенціал іонізації атому металу при випаровуванні. <u>Низькі електрофізичні властивості</u> : величина коефіцієнта Томсона, кут змочування металу в рідкому стані, поверхневий натяг, пружність парів металу при температурі дуги, термоелектрорушійна сила.
Корозія: а) атмосферна б) дугова	Температура та вологість середовища. Наявність хімічно активних домішок. Наявність мікро- і макрогальванічних пар. Наявність пилу та органічних випаровувань. Температура та енергія дуги. Рухливість дуги	Створення «непровідних» плівок Створення «непровідних» плівок, обгоряння контактів	<u>Високі електрохімічні властивості</u> : Електрохімічний потенціал. Пружність дисоціації продуктів корозії <u>Низькі електрохімічні властивості</u> : Спорідненість до кисню, сірки та азоту. Термічна стійкість плівок. Електрична та механічна міцність плівок. Товщина та структура плівок.



Закінчення табл.

Вид зносу	Зовнішні фактори, які викликають знос	У чому виражається знос	Властивості матеріалу контактів, які впливають на знос
Зварювання: а) гаряче б) холодне	Контактний натиск. Щільність струму. Енергія дуги. Контактний натиск. Кінетична енергія при замиканні.	Тимчасове або тривале коротке замикання. Злипання контактів	<u>Високі теплові властивості:</u> температура рекристалізації, кипіння, плавлення, сублімації. Теплота плавлення, кипіння, сублімації, теплоємність. Тепло- та електропровідність.
Всі види зносу			<u>Структурні властивості:</u> Простий тип кристалічної решітки, великий атомний об'єм матеріалу, мала дисперсність мікроструктури в композиційних матеріалах, орієнтування кристалів згідно з напрямком теплового та електричного потоків

зміні одного із факторів може виявитися зовсім непридатним для роботи.

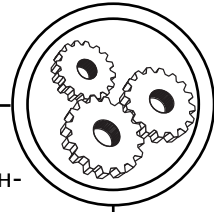
У загальному вигляді контакти повинні характеризуватися наступними фізичними параметрами:

- стабільністю контактного перехідного опору;
- високою питомою електропровідністю;
- високою ерозійною стійкістю та корозійною тривкістю;
- високою дугостійкістю і стійкістю до зварювання;
- поєднанням механічної міцності та високої пластичності [6].

Практично неможливо підібрати універсальний матеріал, який би відповідав усім названим вимогам, тому залежно від функціонального призначення контактної вузла доводиться приймати компромісне рішення.

Контакти електричних апаратів, які працюють в області малих та середніх струмів, повинні, перш за все, забезпечувати стабільність перехідного опору в поєднанні з високими дугостійкістю та стійкістю до зварювання [7].

Перехідний опір залежить від фактичної площі дотику контактів і від питомого опору контактної матеріалу. Ефективна площа контактування залежить від величини контактної натиску і з його ростом збільшується за експоненціальною залежністю до того часу, поки напруження стискування не буде вищою за межу текучості матеріалу. З іншого боку, перехідний опір залежить від опору граничного шару, який визначається його складом (наявність оксидних, сульфідних та інших плівок, пилу тощо) і питомим електричним опором [8].



У кожному окремому випадку при розробці контактної системи для електромеханічних комутаційних апаратів необхідно керуватися деякими загальними положеннями, головні з них наведено нижче.

Фактори, що впливають на експлуатаційні характеристики контактів електричних апаратів

До головних факторів, які обумовлюють роботу контактів електричних апаратів, на думку автора, відносяться наведені нижче:

1. Параметри комутуючого кола:

— величина номінального струму. Чим більша величина номінального струму, тим сильніше нагрівання контактів. Перевагу мають метали з високою тепло- і електропровідністю, які не окислюються при малому контактному натиску;

— рід струму. Електрична ерозія контактів більш виражена при постійному струмі. При змінному струмі перенос матеріалу зменшується, але більше піддається ерозії контакт, температура якого вища. Збільшується оплавлення та обгорання КМ;

— комутуючий струм. При струмі нижче за граничний, електрична дуга не виникає. При збільшенні струму вище за граничний (коли з'являється дуга), явища ерозії, зварювання, окиснення та обгорання зростають разом з енергією дуги і струмом;

— напруга між контактами. Вона визначає виникнення контактної дуги. Нижче граничного значення (для кожного КМ — своє значення) — дуга не вини-

кає, вище — з'являється контактна дуга;

— характер навантаження. Залежно від характеру навантаження змінюються пускові струми, які комутують пускачі, а також від значення \cos змінюється індуктивність кола. Це призводить до виникнення перенапруг і до збільшення часу горіння дуги та ерозії при комутації, а також сприяє зварюванню контактів;

— наявність чи відсутність дугогасильних пристроїв;

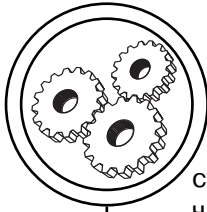
— частота і загальна кількість комутаційних циклів прямо пропорційно впливають на інтенсивність і величину ерозії контактів. Завищена частота спричиняє перегрівання контактів вище за допустиму температуру.

2. Параметри комутуючих пристроїв електричних апаратів:

— номінальний контактний натиск. Незначний натиск зменшує ерозію матеріалу, але спричиняє підвищення перехідного контактного опору. При достатньо великих зусиллях можна застосовувати матеріали, які окислюються, зважаючи при цьому на характеристики механічної міцності;

— конструктивні фактори. Деренчання контактів при замиканні значно збільшує ерозію і зварювання внаслідок послідовних комутаційних операцій пускового струму;

— швидкість контактів при комутації. Збільшення швидкості при розмиканні скорочує час горіння дуги при постійному струмі, зменшуючи ерозію. Велика швидкість при змінному



струмі збільшує перенапругу і час горіння;

— розміри та геометрична форма контакт-деталей. Розміри (діаметр, товщина) потрібно стандартизувати, узгоджуючи з величиною пускача та виходячи з економічної доцільності. Геометрична форма вибирається, виходячи зі збільшення умовної площі контактування і зменшення ерозії матеріалу;

— величина розхилу контактів має значення, оскільки вона визначає максимальну напругу на контактах, яка не здатна пробити цей контактний проміжок;

— теплофізичні та механічні характеристики КМ для розривних контактів (стійкість проти електричної ерозії, зварювання; корозійна тривкість; достатній опір механічному зношуванню, технологічність; низька вартість і не дефіцитність).

3. Кліматичний вплив навколишнього середовища викликає ріст «хімічних плівок» на контактних поверхнях, що призводить до збільшення перехідного опору та поступових відмов пускача [3].

Немає можливості безпомилково рекомендувати матеріал, придатний для роботи в будь-яких заданих умовах, необхідно кінцевий вибір обґрунтовувати на випробуванні в контактних апаратах і в умовах, що відповідають дійсним умовам роботи контактів в експлуатації.

Однак при сучасних знаннях природи зносу розривних контактів можна дати основні вказівки щодо вибору типу матеріалу залежно від потужності, при якій призначено працювати контактам.

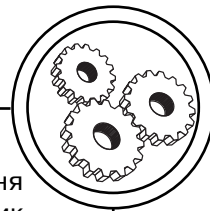
Для малонавантажених контактів, що працюють нижче межі дугоутворення і піддаються містковій ерозії, найбільш придатні метали з високою тепло- і електропровідністю. Допустиме слабе легування іншими металами, в тому числі і неблагородними, з метою підвищення твердості і зменшення голкоутворення [9].

Для середньонавантажених контактів, які працюють з утворенням контактної дуги, придатні туготопкі метали, а також сплави типу твердих розчинів. Для зменшення зварювання доцільно вводити в сплав або композицію оксиди металів, які при певних умовах дисоціюють, не порушуючи контактної провідності [10].

Для високонавантажених контактів найбільш придатні композиції, які поєднують високу зносостійкість тугоплавких металів та електро- і теплопровідність, наприклад, Cu чи Ag.

Висновки

У статті узагальнено та систематизовано фактори, які впливають на зносостійкість і функціональність контактів комутаційних апаратів. Для цього було проаналізовано види зносу, яким піддається електричний апарат під час експлуатації та визначено властивості контактного матеріалу — механічні, фізичні, хімічні, структурні, які зменшують переважаючий вид зносу залежно від режимів роботи і умов експлуатації апарату. Також наведено перелік параметрів комутуючого кола і пристроїв електричних апаратів, які впливають на процеси зношення матеріалу контактів та загальні положення щодо



вибору типу матеріалу, якими необхідно керуватися при розробці контактної системи для електромеханічних комутаційних апаратів.

Результати дослідження можуть використовуватися при

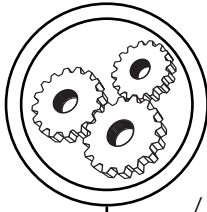
вирішенні задач підвищення експлуатаційних характеристик електричних апаратів шляхом розробки і застосування нових контактних матеріалів, удосконалення конструкції контактних та дугогасних систем та ін.

Список використаної літератури

1. Пархоменко И. В. Анализ эрозионных процессов на контактах при коммутации тока в различных средах / И. В. Пархоменко // Электрические низковольтные аппараты. — К. : Техніка, 1975. — 305 с.
2. Минакова Р. В. Композиционные материалы для контактов и электродов (Обзор) / Р. В. Минакова, М. Л. Грекова, А. П. Кресанова, Л. А. Крячко // Порошковая металлургия. — 1995. — № 7/8. — С. 32–53.
3. Кальман И. Г. Воздействие факторов внешней среды на аппаратуру и элементы / И. Г. Кальман. — М. : Знание, 1971.
4. Берберов А. Э. Свариваемость контактов под действием импульсных токов / А. Э. Берберов, Е. В. Володина, В. Г. Дегтярь, В. А. Моргунов // Пути повышения ресурса и надежности электрических аппаратов. — Сб. научн. тр. МЭИ. — 1988. — № 167. — С. 39–43.
5. Афонин М. П. Классификация материалов для электрических контактов низковольтной коммутационной аппаратуры и области их применения в электротехнике. — Электрические контакты и электроды / М. П. Афонин, М. Н. Овчинникова // Труды Института материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. — Киев, 2006. — С. 153–160.
6. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / [Под ред. В. В. Афанасьева.] — Л. : Энергоатомиздат, 1988. — 381 с.
7. Контактори електромагнітні низьковольтні. Загальні технічні умови : ДСТУ 2846-94. — [чинний від 01.01.1996]. — К. : Держспоживстандарт України, 2006. — 18 с. — (Національні стандарти України).
8. Копытин Ф. А. Сравнительные соотношения расчетных и экспериментальных данных сопротивления электрических контактов / Ф. А. Копытин // Электротехническая промышленность. Серия «Аппараты низкого напряжения». — 1971. — № 7. — С. 12–15.
9. Разумихин М. А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов / М. А. Разумихин. — Л. : Энергия, 1964. — 83 с.
10. Клименко Б. В. Огляд та перспективи розвитку матеріалів для контактів електромеханічних апаратів низької напруги / Б. В. Клименко, В. О. Кохановський // Електротехніка і електромеханіка. — Харків : НТУ «ХПІ». — 2011. — № 4. — С. 34–40.

References

1. Parhomenko I. V. Analiz jerozionnyh processov na kontaktah pri kommutacii toka v razlichnyh sredah / I. V. Parhomenko // Jelektricheskie nizkovol'tnye apparaty. — K. : Tehnika, 1975. — 305 s.
2. Minakova R. V. Kompozicionnye materialy dlja kontaktov i jelektrodov (Obzor) / R. V. Minakova, M. L. Grekova, A. P. Kresanova, L. A. Krjachko // Poroshkovaja metallurgija. — 1995. — № 7/8. — S. 32–53.
3. Kal'man I. G. Vozdejstvie faktorov vneshnej sredy na apparaturu i elementy / I. G. Kal'man. — M. : Znanie, 1971.



4. Berberov A. Je. Svarivaemost' kontaktov pod dejstviem impul'snyh tokov / A. Je. Berberov, E. V. Volodina, V. G. Degtjar', V. A. Morgunov // Puti povysheniya resursa i nadezhnosti jelektricheskikh apparatov. — Sb. nauchn. tr. MJel. — 1988. — № 167. — S. 39–43.
5. Afonin M. P. Klasifikacija materialov dlja jelektricheskikh kontaktov nizkovol'noj kommutacionnoj apparatury i oblasti ih primenenija v jelekrotehnikе. — Jelektricheskie kontakty i jelektrody / M. P. Afonin, M. N. Ovchinnikova // Trudy Instituta materialovedenija im. I. N. Francevicha NAN Ukrainy. — Kiev, 2006. — S. 153–160.
6. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniu kontaktnyh chastej sil'notochnyh jelektricheskikh apparatov / [Pod red. V. V. Afanas'eva.] — L. : Jenergoatomizdat, 1988. — 381 s.
7. Kontakty elektromahnitni nyzkovoltni. Zahalni tekhnichni umovy : DSTU 2846-94. — [chynnyi vid 01.01.1996]. — K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006. — 18 s. — (Natsionalni standarty Ukrainy).
8. Kopytin F. A. Sravnitel'nye sootnoshenija raschetnyh i jeksperimental'nyh dannyh soprotivlenija jelektricheskikh kontaktov / F. A. Kopytin // Jelekrotehnicheskaja promyshlennost'. Serija «Apparaty nizkogo naprjazhenija». — 1971. — № 7. — S. 12–15.
9. Razumihin M. A. Jerozionnaja ustojchivost' malomoshhnyh kontaktov / M. A. Razumihin. — L. : Jenergija, 1964. — 83 s.
10. Klymenko B. V. Ohliad ta perspektyvy rozvytku materialiv dlia kontaktiv elektromekhanichnykh aparativ nyzkoi napruhy / B. V. Klymenko, V. O. Kokhanovskiy // Elektrotehnika i elektromekhanika. — Kharkiv : NTU «KhPI». — 2011. — № 4. — S. 34–40.

В статье приведен обзор факторов влияния на эксплуатационные характеристики контактов электромеханических коммутационных аппаратов и пути повышения их износостойкости.

Ключевые слова: электрические контакты, коммутационные аппараты, износостойкость, контактные материалы, эксплуатационные характеристики, свойства материалов.

This article provides an overview of factors influence to the operating characteristics of contacts of electromechanical switching devices and ways to improve their durability.

Keywords: electrical contacts, switching devices, durability, contact's materials, operating characteristics, material properties.

Рецензент — Ю. М. Васьковський, д.т.н.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 16.12.14