

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ ПМЛ-2100

В. В. Коробський, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Васюк, кандидат технічних наук, доцент

А. С. Костенко, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

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

Анотація. Запропоновано заміну серійних контакт-деталей на основі срібла експериментальними контактними вузлами на основі міді. Для визначення працездатності та виробничої експлуатації дослідних контактів були проведені кліматичні випробування контактних матеріалів.

Внаслідок зміни контактного опору і маси зразків контактних матеріалів на основі міді з термодинамічно стійкими домішками та на основі петрографічного аналізу продуктів їх взаємодії оцінено перехідний опір та корозійну тривкість електроконтактних матеріалів в хімічно активних середовищах. Показано стабільний перехідний опір та високу корозійну тривкість досліджених мідних матеріалів у середовищах NH_3 і $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Для визначення працездатності пускачів були здійснені випробування на комутаційну зносостійкість. Ці дослідження проведені для серійних контактних частин електромагнітних пускачів ПМЛ-2100О4 та металокерамічних контактних частин на основі міді з домішками металів та термодинамічно стійких сполук.

З метою підвищення надійності контактної системи електромагнітного пускача і реле в цілому пропонується замінити серійні контактні частини на контактні частини на основі міді.

Ключові слова: *надійність електромагнітних пускачів, контактні матеріали на основі міді, перехідний опір, корозійна тривкість, комутаційна зносостійкість, кліматичні випробування*

Актуальність. Вивчення надійності електричних контактів комутаційних апаратів є предметом досліджень багатьох авторів [1, 2]. Особливо плідно над цією проблемою працював Сотсков Б.С., який акцентував увагу на визначенні показників надійності (кількісних оцінок) електричних контактів. Його ідеї стосовно слаботочних контактів розвинули Декабрун І.Е., Штремберг Т.К., Кузнецов Р.С. [3]

Проблеми і аспекти фізичної природи зношування, процесу старіння електричних комутаційних апаратів та вплив окремих факторів на їх працездатність

розглядалися на спеціальних нарадах та багатьох міжнародних конференціях. В той же час Сотсков Б.С., Burkhart S., Кузнецов Р.С. та інші дослідники в своїх працях приділяли увагу визначенню кількісних оцінок надійності електричних контактів комутаційних апаратів низької напруги. Дослідження в цьому напрямку проводили Корчемний М.О., Машевський В.П., Таран В.П., Філоненко А.Ф., Сагач М.Ф., Коханівський С.П., Солоний В.І., Наливайко В.А. [4, 5, 6, 7].

Взагалі показники надійності вибираються для одного виду апарату залежно від конкретних задач, які вирішуються. Наслідком цього є велика різноманітність показників, які вказані в нормативних документах на конкретний апарат і відсутність єдиного підходу до їхнього вибору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи те, що головним елементом конструкції електричних комутаційних апаратів (пускарів) є комутуючий пристрій (контактна система), а всі інші елементи і вузли пускача відіграють в основному підрядну функцію, то за основні показники надійності пускача можна прийняти показники комутуючого пристрою.

Надійність електричного контакту значною мірою визначається компонентами, що входять до його складу, структурою і властивостями поверхневих шарів, які утворюються в результаті ерозії та перенесення матеріалу контакту в електричній дузі [2, 3]. Основним компонентом для контактних матеріалів найпоширеніших електромагнітних пускачів є срібло. Корозія робочих поверхонь контактів пускачів, яка відбувається під дією хімічно-активних домішок середовища, також є одним із головних факторів зносу і відмов. Контакти пускачів ПМЛ, ПМЛ_о-1, ПМ, ПМК, ПМЕ, ПМА, ПАЕ виготовлені з матеріалу на основі срібла (СрН-90, СрМ-0,2+М1, СОК-15, КМК-А10м тощо).

Як правило, до складу технологічного обладнання тваринницьких ферм і комплексів переважно входять електромагнітні пускачі загальнопромислового призначення класу зносостійкості Б, В. Такі пускачі непридатні для тривалої експлуатації в конкретних умовах сільського господарства, оскільки не відповідають вимогам із захисту від впливу навколишнього середовища, виходять з ладу до досягнення певного ресурсу зносостійкості, і це, в першу чергу, стосується контактної

системи (до 30 % всіх відмов у пускачах) [1]. Сьогоднішня сучасна електротехнічна промисловість не випускає пускачі та реле для потреб агропромислового сектору [3].

Виходячи із наведених положень, основними критеріями надійності комутуючого пристрою ЕМП будемо вважати такі параметри: комутаційну зносостійкість (характеризується електроерозійним зносом), *надійність контактування (контактний перехідний опір $R_{пер}$)*, а в цілому для пускачів - середній термін служби $T_{сл}$.

Мета дослідження – проведення досліджень характеристик електромагнітних пускачів із серійною та дослідною контактною частинами та виявлення впливу параметрів агресивного середовища на показники надійності контактних систем пускачів.

Матеріали та методи дослідження. Авторами проведено випробування з визначення електроерозійної стійкості та перехідного опору в серійних контактних частин пускачів ПМЛ-2100 (матеріал контакту КМК-А10м) і пускачів ПМЛ-2100 з експериментальними мідними контакт-деталлями (матеріал $Cu+Cr+TiB_2+Nb+C+Zr$).

Вивчалась корозійна тривкість на зразках міді та її сплавів. Для сплавів домішки можна розділити на три групи: метали з необмеженою розчинністю в міді (Ni); метали з обмеженою розчинністю (Nb, Ti, Cr, Zr); метали, які не взаємодіють з міддю (Mo). Домішки складала 1;5 і 10 ваг. % .

Ріст плівкового покриття фіксувався шляхом зміни перехідного контактного опору. Перехідний контактний опір і корозійна тривкість матеріалів оцінюється згідно шкали корозійної тривкості (за п`ятибальною системою).

Випробування з визначення перехідного опору контакт-деталей пускачів проводяться в нормальному комутаційному режимі (категорія АС-3) за таких кліматичних умов: $t=25\pm 10C^\circ$, $\varphi=45\div 80\%$, $p=84\div 100$ кПа, при впливі агресивного середовища. Ці випробування проводяться для пускачів та реле для кожного матеріалу контактів. Загальна кількість циклів увімкнення-вимкнення для всіх апаратів приймається однаковою і дорівнює 300 тисячам. Необхідні вимірювання проводили кожні 50 тис. циклів комутацій, частота перемикачів визначалася

вимогами стандарту [6]. Для пускачів першої величини вибирається струмове навантаження, виходячи зі значення номінального робочого струму 10А.

Вимірювання *електричного опору* зразків проводяться методом вольтметра-амперметра на постійному струмі з використанням вольтметра постійного струму типу В2-36. Похибка при вимірюваннях не перевищувала 0,5%.

Надійність контактування оцінюється за характером зміни перехідного опору. *Перехідний опір* експериментальних контактних пар визначається методом вольтметра-амперметра з використанням універсального вольтметра В7-35 і амперметра із дзеркальною шкалою Э514 з класом точності 0,5. Заміри перехідного опору проводяться до і після кожної серії комутаційних циклів при протіканні номінального струму. Для кожної пари проводяться 10 замірів спаду напруги після кожної комутації з витримкою часу в замкнутому стані 10 с. Для пускача спад напруги визначається на кожному полюсі головного кола.

Опір контакту ΔR (МОм) розраховується за формулою [7]:

$$\Delta R = \frac{\Delta U}{I}, \quad (1)$$

де ΔU - спад напруги на контактному переході, виміряний вольтметром В7-35, мВ;
 I - струм, що виміряний амперметром Э514, А.

Випробувальна камера. Згідно нормативних вимог вибирається вид випробування 1.2.16: випробування на вплив атмосфери з корозійно-активними агентами. Для моделювання заданої температури і вологості використовується кліматична камера, яка дозволяє регулювати температуру в межах від -25 °С до $+60$ °С і автоматично підтримувати задане значення з точністю 1 %. Діапазон зміни відносної вологості в робочому об'ємі камери регулюється в межах 20-95 % з точністю 3 % при температурі $+(25...55)$ °С. Для створення в лабораторних умовах спеціального корозивного середовища виготовлена спеціальна герметична приставка (ексикатор) до камери, яка зображена на рис. 1. Приставка 5 прямокутної форми виготовляється зі штучного органічного скла завтовшки 5 мм, розмірами $800 \times 600 \times 500$ мм (об'єм - $0,24$ м³) таким чином, щоб вона могла розміститись в робочому відсіку основної камери і давала можливість спостерігати за

випробувальними зразками. Освітленість денним світлом всередині камери складає 50-300 лк.

Нижня горизонтальна площадка з'єднується з вертикальними стінками за допомогою гумової прокладки, яка змащується вакуумним мастилом. Зразки матеріалів розміщуються в фарфорових підставках спеціальної касети 6, а пускачі закріплюються на монтажному блоці (струмопідвід здійснюється без порушення герметичності), робоче положення пускачів в просторі - вертикальне, при цьому забезпечується вільна циркуляція середовища між ними. Вологість всередині ексикатора регулюється в межах 40-100 % завдяки знаходженню всередині ексикатора водяної ванни з водонагрівачем 10 і електроventильатора 8, який знаходиться безпосередньо над поверхнею води.

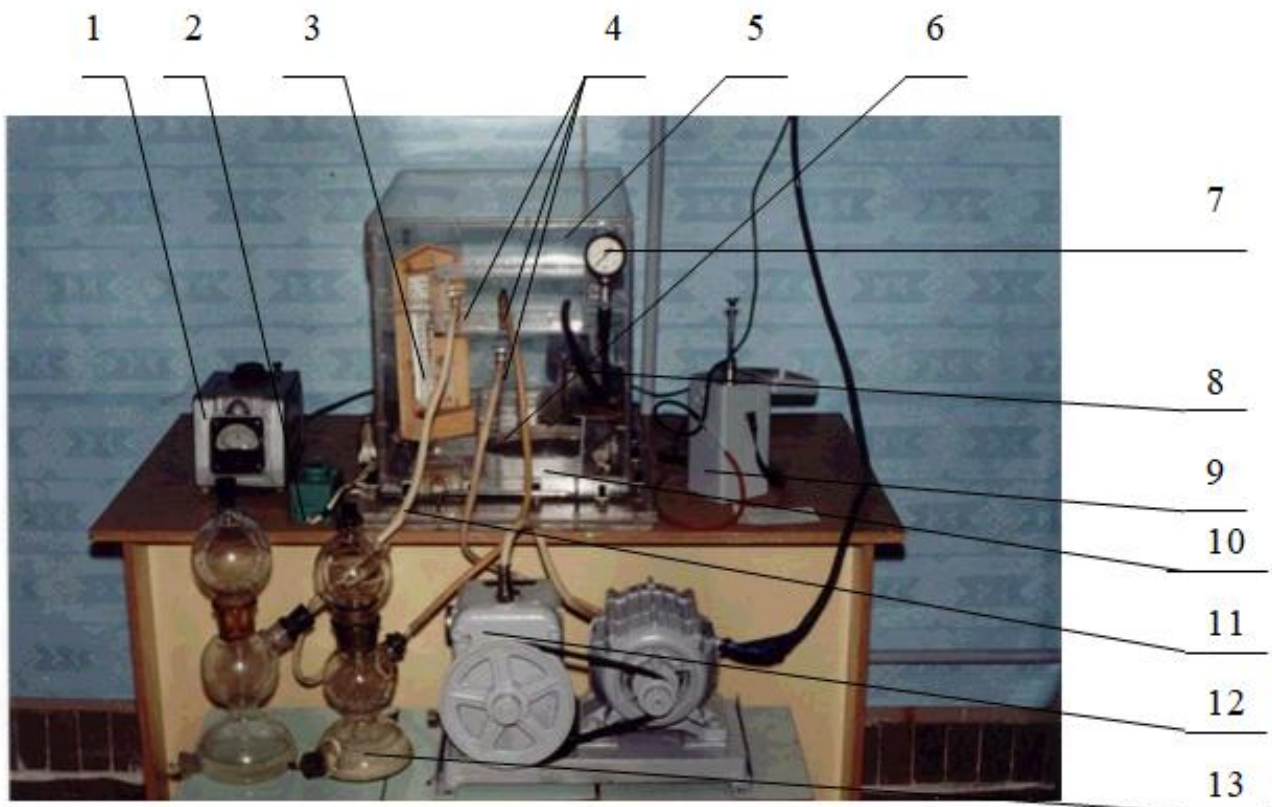


Рис. 1. Загальний вигляд спеціальної герметичної приставки до кліматичної камери (для проведення лабораторних кліматичних випробувань):

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1 – автотрансформатор; | 8 – електроventильатор; |
| 2 – вимикач ПНВС; | 9 – газоаналізатор УГ-2; |
| 3 – гігрометр ВІП-2; | 10 – водонагрівач; |
| 4 – скляний ventиль; | 11 – гумові трубки; |
| 5 – приставка (ексикатор); | 12 – вакуум-нагнігач; |
| 6 – спеціальна касета; | 13 – апарат Кіпа. |
| 7 – манометр; | |

Електропідігрівач, що приєднаний до електромережі через автотрансформатор 1, регулює температуру води у ванні, при цьому контролюється процес випаровування води, завдяки чому встановлюється визначена вологість. Всередині ексикатора вологість контролюється гігрометром ВІП-2 (позиція 3). Електроventильатор рівномірно перемішує спеціальне середовище зі швидкістю до 10 мм/с і створює однакові умови по всьому об'єму ексикатора.

На передній вертикальній стінці приставки є декілька вентилів 4, які призначені для подачі корозивного середовища до приставки, приєднання електричного вакуум-нагнітача 12, газоаналізатора 9, для вирівнювання атмосферного тиску і випуску випробувального середовища. Для отримання агресивних компонентів корозивного середовища (газів NH_3 , H_2S , CO_2 та їх сумішей) використовуються два апарати Кіпа 13, які з'єднуються з вентилями за допомогою гнучких гумових трубок 11. Потрібна концентрація агресивного компоненту всередині ексикатора отримується шляхом примусового нагнітання або відкачування повітряного середовища вакуум-нагнітачем до рівня 40-55 кПа. При цьому відзначаються покази манометра 7, щоб тиск в ексикаторі відповідав нормальним умовам (84,0-106,7 кПа).

Наведені вище схема і компонування випробувальної камери дозволяють отримувати спеціальне середовище, параметри якого задаються планом дослідження і при цьому активно впливати на процес дослідження при відхиленні параметрів середовища від встановлених значень.

Спеціальне корозивне середовище. Для отримання за короткий період необхідної інформації, процес впливу агресивного середовища прискорюється за рахунок зміни умов впливу шляхом:

- підвищення відносної вологості до значення 83-98 %;
- збільшення концентрації корозійних агентів (газів).

Випробувальна однорідна газоповітряна суміш отримується шляхом змішування газу із повітрям визначеної вологості. Для утворення газів використовується реакційний метод із застосуванням апаратів Кіпа. При змішуванні і з'єднанні необхідних компонентів протікають хімічні реакції за таких рівнянь:



Номінальне верхнє значення концентрації агресивних газів при впливі на контактні матеріали встановлюється згідно граничних робочих значень кліматичних факторів зовнішнього середовища і при експлуатації і становить для:

- аміаку NH_320 мг/м³;
- сірководню H_2S10 мг/м³;
- вуглекислого газу CO_230000 мг/м³;
- суміші $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S}$(20+10) мг/м³.

При випробуваннях пускачів масова концентрація аміаку збільшується до 30 мг/м³, а сірководню - до 25 мг/м³. Спеціальне корозивне середовище складається із суміші газів $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S}$. Концентрація агресивних газів вимірюється за допомогою універсального газоаналізатора УГ-2 з точністю до ± 10 % (допускається підтримання масової концентрації агресивного середовища в камері з точністю до ± 25 %); при цьому застосовується метод фотоколориметричного визначення концентрації.

Витримка. До початку випробування, завдяки вимірюванням, встановлюється стабільна концентрація агресивних газів, стабільна температура, вологість. Завдяки взаємодії компонентів із повітрям та природному розкладанню концентрація газів зменшується. Тому, під час випробувань періодично, два рази на добу проводяться вимірювання для контролю цих умов і при відхиленні від встановлених значень коригуються параметри спеціального середовища. Особливо це стосується концентрації агресивних газів, тому що при дослідженні виробничих умов експлуатації електромагнітних пускачів нами встановлено два максимуми збільшення концентрації агресивних газів в тваринницьких приміщеннях за добу.

Тривалість випробування вибирається так, щоб можна оцінити поведінку зразків контактних матеріалів і виявити хід корозії в процесі випробувань. Тому проводяться періодичні зняття зразків контактних матеріалів для контролю параметрів корозійної тривкості. Після видалення зразків із камери вони

витримуються в нормальних умовах 1 годину, потім проводяться необхідні заміри параметрів корозійної тривкості. Заміри проводяться перед початком випробувань, протягом 4 діб, 10 діб і 21 доби перебування зразків в корозивному середовищі. Подібні вимоги щодо витримки контактів із Au, Ag, Pt, Cu під час проведення кліматичних випробувань висуваються і в країнах Європи.

Вимоги до зразків матеріалів, вимірювання і обробка результатів. Показники корозійної тривкості використовуються кількісні і напівкількісні (контактний опір оцінюється за п'ятибальною системою). Корозійна тривкість зразків контактних матеріалів визначається за видом корозії та експлуатаційними вимогами за такими показниками:

- корозійні втрати на одиницю площі (інтегральний показник корозії);
- електричний контактний опір.

Для суцільної корозії, яка спостерігається під час проведення випробування, корозійні втрати на одиницю площі поверхні Δm_s обчислюються за формулою:

$$\Delta m_s = \frac{m_{0\text{ кор}} - m_{1\text{ кор}}}{S}, \text{ кг/м}^2 \quad (2)$$

де $m_{0\text{ кор}}$ - маса зразка до випробувань, кг; $m_{1\text{ кор}}$ - маса зразка після випробувань без усунення продуктів корозії, кг; S - площа поверхні зразка, м^2 .

Електричний контактний опір визначається методом малих ЕРС за формулою (1) за Стандартом МЭК публ. 130-1 п.п.14.1.1, що дозволяє уникнути руйнування оксидних плівок на контактних поверхнях. При цьому зразки контактів закріплюються в спеціальному пристрої та при контактному натиску 100 г (0,98 Н), постійному струмі величиною 2 А, напрузі 36 В, вимірюється спад напруги на контактах - по 10 замірів на трьох парах контактів з витримкою часу по 10 с.

Електроерозійний знос визначається на основі зміни маси:

$$m_2 = m_1 - k \cdot n, \quad (3)$$

де m_1 - маса контакту перед початком комутаційних випробувань, г; m_2 - маса контакту після серії комутаційних випробувань, г. k - коефіцієнт інтенсивності зношування, г/цикл; n - кількість комутаційних циклів, цикл.

Результати досліджень та їх обговорення. Метою лабораторних кліматичних випробувань є визначення впливу спеціального середовища тваринницьких приміщень, яке вміщує продукти життєдіяльності тварин (аміак, сірководень, вуглекислий газ тощо) при підвищеній вологості, на властивості контактів, що виготовлені з матеріалів на основі срібла та міді, а також для визначення параметрів надійності пускачів (комутаційної зносостійкості, перехідного опору) при експлуатації в подібних середовищах. Суть методу полягає в експонуванні зразків контактних матеріалів і пускачів в умовах спеціального фізично-змодельованого середовища тваринницьких приміщень з наступною оцінкою їх корозійної тривкості. Ці випробування дозволяють за короткий період часу визначити поведінку матеріалів, яка може бути порівняна з їх характеристиками в умовах експлуатації протягом декількох років.

Як показали досліди, корозивне газове середовище суттєво впливає на властивості електроконтактних матеріалів. Внаслідок різних хімічних процесів, а також формування твердих шарів різної природи і товщини, значно змінюється перехідний контактний опір зразків.

Встановлено, що найбільш впливає корозивне середовище на контакти, які працюють в суміші сірководню з аміаком, особливо при наявності вологи.

Найбільшу тривкість мають контакти, випробувані в NH_3 , CO_2 (табл. 1). У цьому випадку поверхня контактів вкрита прошарком чорного кольору, який є оксидом міді CuO . Досить наочно це можна побачити на рис. 2, де представлено фотографії зразків контактних матеріалів після витримки в різних корозивних середовищах.

У середовищі аміаку при доступі повітря на поверхні міді та її сплавів виникає комплексний гідроксид $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, який розчиняється у воді. Внаслідок цього контактний опір зразків змінюється мало ($R_k \leq 50 \text{ мОм}$). Петрографічним аналізом продуктів взаємодії на поверхні зразків виявлено скупчення дрібних анізотропних зерен гідроксиду блакитно-зеленуватого кольору з показником переломлення $n=1,70$. Ці зерна оточені більш блідими анізотропними шарами з'єднань, які характеризуються коефіцієнтами переломлення 1,5-1,6. Напевно, поряд

із основним продуктом взаємодії $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$ при невеликих концентраціях аміаку тут утворюються також комплексні гідроксиди, які мають координаційне число, відмінне від чотирьох. Так, в досліджуваних розчинах існує рівновага між катіонами, які відповідають різним значенням координаційного числа. У нашому випадку також відбувається утворення невеликої кількості гідроксидів $[\text{Cu}(\text{NH}_3)](\text{OH})_2$, $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_3](\text{OH})_2$ і $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_5](\text{OH})_2$, які дещо відрізняються за оптичними властивостями.

1. Вплив корозивного середовища на перехідний контактний опір та корозійну тривкість контактних матеріалів на основі міді

Сплави	NH_3		CO_2		H_2S		$\text{H}_2\text{S}+\text{NH}_3$	
	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість
1. Cu 99,99%	5	4	5	5	5	3	5	2
2. Cu+1% Zr	5	2	5	5	4	2	4	2
3. Cu+5% Zr	5	1	5	3	3	1	3	1
4. Cu+10% Zr	4	1	5	1	3	1	2	1
5. Cu+1% Nb	5	4	5	5	3	3	3	2
6. Cu+5% Nb	5	1	5	5	4	2	3	2
7. Cu+10% Nb	5	1	5	3	3	1	3	2
8. Cu+1% Mo	5	4	5	5	3	4	2	2
9. Cu+5% Mo	5	4	5	5	2	3	2	2
10. Cu+10% Mo	5	2	5	5	2	1	2	2
11. Cu+1% Ni	5	4	5	5	4	3	4	2
12. Cu+5% Ni	5	4	5	4	5	3	3	2
13. Cu+10% Ni	5	4	5	5	5	2	3	2
14. Cu+1% Cr	5	4	5	4	5	3	3	2
15. Cu+5% Cr	5	4	5	4	4	3	1	2
16. Cu+10% Cr	5	4	5	3	3	3	1	2
17. Cu+1% Ti	5	4	5	4	4	3	3	2
18. Cu+5% Ti	5	4	5	4	4	2	3	2
19. Cu+10% Ti	4	4	5	4	4	2	2	2
20. Cu+10%Nb+1%С	5	3	5	4	4	2	4	2
21. Cu+10%Mo+1%С	5	3	5	4	5	2	4	1
22. Cu+10%Cr+1%С	5	4	4	4	4	3	4	2
23. 83% Cu+12%Mo+1,7%С+ 2,4% MoO ₃ +0,9%Ni	5	4	5	5	5	4	5	3
24. 83,5% Cu+15%Nb+ 1,0% Zr+0,5% Y ₂ O ₃	5	4	5	5	5	3	4	3
25. 81,3% Cu+10%Cr+3%Nb +3% TiB ₂ +2%С+0,7% Zr	5	5	5	5	5	4	5	3

Примітки: 1. Перехідний контактний опір:

5 – $R_k \leq 50$ мОм; 4 – $R_k \leq 100$ мОм; 3 – $R_k \leq 200$ мОм; 2 – $R_k \leq 300$ мОм; 1 – $R_k > 300$ мОм.

2. Корозійні втрати:

5 – $\Delta m/s \leq 1$ г/м²; 4 – $\Delta m/s \leq 3$ г/м²; 3 – $\Delta m/s \leq 5$ г/м²; 2 – $\Delta m/s \leq 10$ г/м²; 1 – $\Delta m/s > 10$ г/м².

Як у середовищі аміаку, так і в інших дослідних корозивних середовищах оксиди металів-домішок ZrO_2 , Nb_2O_5 , MoO_3 , NiO , Cr_2O_3 і TiO_2 , які виникають в невеликих кількостях (<5 ваг.%) на зразках у вологому повітрі, петрографічно не визначаються. У той час підвищення перехідного опору і зниження корозійної тривкості контактних матеріалів, які містять крім міді порівняно велику (5-10 ваг.%) кількість Zr, Nb, Mo та інших перехідних металів, пояснюється утворенням в процесі взаємодії оксидів ZrO_2 , Nb_2O_5 , MoO_3 з великим співвідношенням Пілінга-Бедворса (відношення питомих об'ємів оксиду і металу). Це сприяє розтріскуванню окалини і збільшує можливість проникнення аміаку до основи зразків з подальшим утворенням основного продукту взаємодії - гідроксиду тетраамінміді.

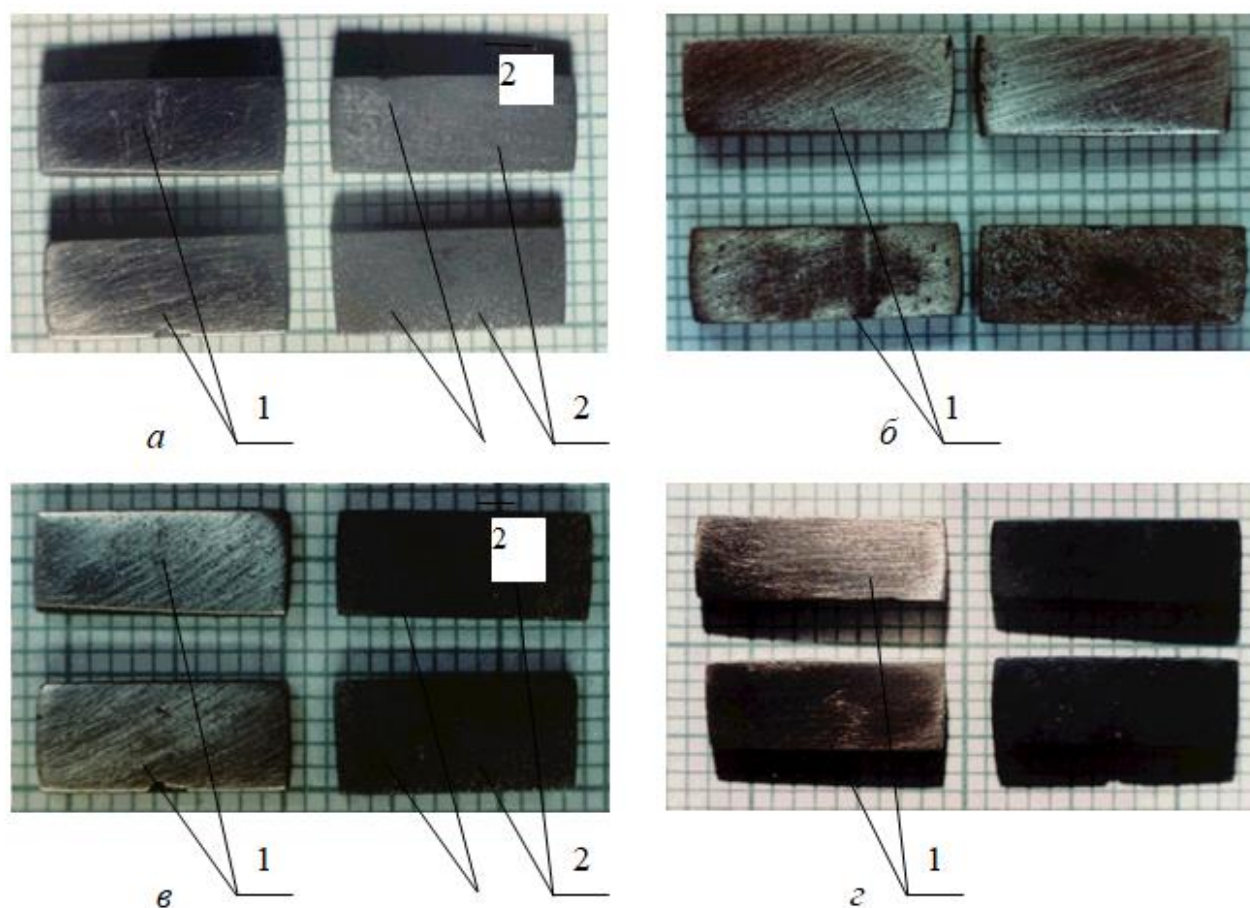


Рис. 2. Зразки контактного матеріалу до (1) і після 21 доби витримки (2) в корозивному середовищі, яке містить:

a – CO_2 ; *б* – NH_3 ; *в* – H_2S ; *г* – H_2S+NH_3 ; (верхні – 81,3% Cu+10% Cr+2% TiB_2 +3% Nb+2% C+0,7% Zr, нижні - Cu)

Задовільні антикорозійні властивості проявляють майже всі вивчені матеріали і в середовищі діоксиду вуглецю (CO_2). Потрібно відзначити, що продуктів хімічної

реакції тут менше, ніж в середовищі аміаку. Як відомо, в сухому середовищі на повітрі мідь майже не змінюється, оскільки на її поверхні формується дуже тонка плівка оксидів Cu_2O і CuO більш темного кольору, яка є добрим захистом від подальшого окислення. Але в наших дослідах, у присутності діоксиду вуглецю і вологи, поверхня міді та матеріалів на основі міді вкривається зеленуватим налітом гідроксокарбоната міді $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$.

Останній ідентифікується в мікроскопі за значеннями відповідних кристалооптичних констант. У випадку чистої міді в поверхневому шарі зразків петрографічно знаходяться рівномірно розподілені частинки міді, а вказана сіль спостерігається в дуже невеликих кількостях. У сплавах міді особливо з Zr (10 ваг. %) її набагато більше. При цьому навколо дрібних зерен міді скупчуються коричнево-зеленуваті ізотропні зерна $(\text{CuOH})_2\text{CO}$ такого ж розміру (1-2 мкм) з показником переломлення $n=1,8$. Оскільки основні солі міді розчинні у воді, тверді шари на зразках контактних матеріалів не утворюються і контактний опір матеріалів у середовищі CO_2 , як правило, $R_k \leq 50$ мОм.

Корозійна тривкість електроконтактних матеріалів на основі міді значно погіршується в сірководні. При цьому встановлений механізм взаємодії в усіх дослідних випадках не відповідає процесу сульфідотворення. CuS і інші сульфіди металів при відносній вологості середовища 95-98 % кристалооптично не визначаються. Так, продукти взаємодії з H_2S , розташовані шарами на поверхні зразка Cu 99,99 %, складаються з невеликої кількості оксиду міді Cu_2O червонуватого кольору (перший внутрішній шар) і червонувато-коричневих зерен оксисульфату міді $\text{Cu}_2(\text{SO}_4)\text{O}$ з високим двопереломленням (другий шар). У зовнішніх шарах продуктів взаємодії петрографічно фіксується гідроксосульфат міді $\text{Cu}_3(\text{OH})_4\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ у вигляді блідувато-зелених скупчень анізотропних зерен з показником переломлення $n=1,65$, а також сульфат міді $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, який має безбарвні анізотропні зерна з меншим показником переломлення. При переході від міді і мідно-нікелевих сплавів, які являють собою тверді суміші нікелю в міді, до сплавів міді, які являються механічною сумішшю компонентів, вміст окисолі в

продуктах взаємодії збільшується від 20 до 30 ваг.% і більше, а вміст гідроксолі відповідно зменшується від 50 до 35- 40 ваг.%.

Хімічні реакції, які описують механізм корозії вивчених електроконтактних матеріалів в корозивних середовищах можуть проходити при кімнатній температурі. При цьому контактний опір зразків в середовищі H_2S зростає до 100 мОм.

У випадку суміші H_2S+NH_3 контактний опір збільшується до 300 мОм і більше (рис. 3). Тут корозійна тривкість контактів найменша в порівнянні з іншими спеціальними корозивними середовищами, а приріст маси зразка після досліду становить ~ 10 г/м². Петрографічно в продуктах взаємодії виявляються ті ж фази, що і в середовищі H_2S : Cu_2O , CuO , $Cu_2(SO_4)O$, $Cu_4(OH)_6SO_4$, $CuSO_4 \cdot 7H_2O$, але також присутні і аміаки $[Cu(NH_3)_4]SO_4 \cdot H_2O$ і $[Cu(NH_3)_2]SO_4 \cdot 3H_2O$. Сіль більш складніша: $[Cu_2(SO_4) \cdot (NH_3)_4]SO_4$ та відповідний їй гідроксид, які виявлені раніше, не помічені.

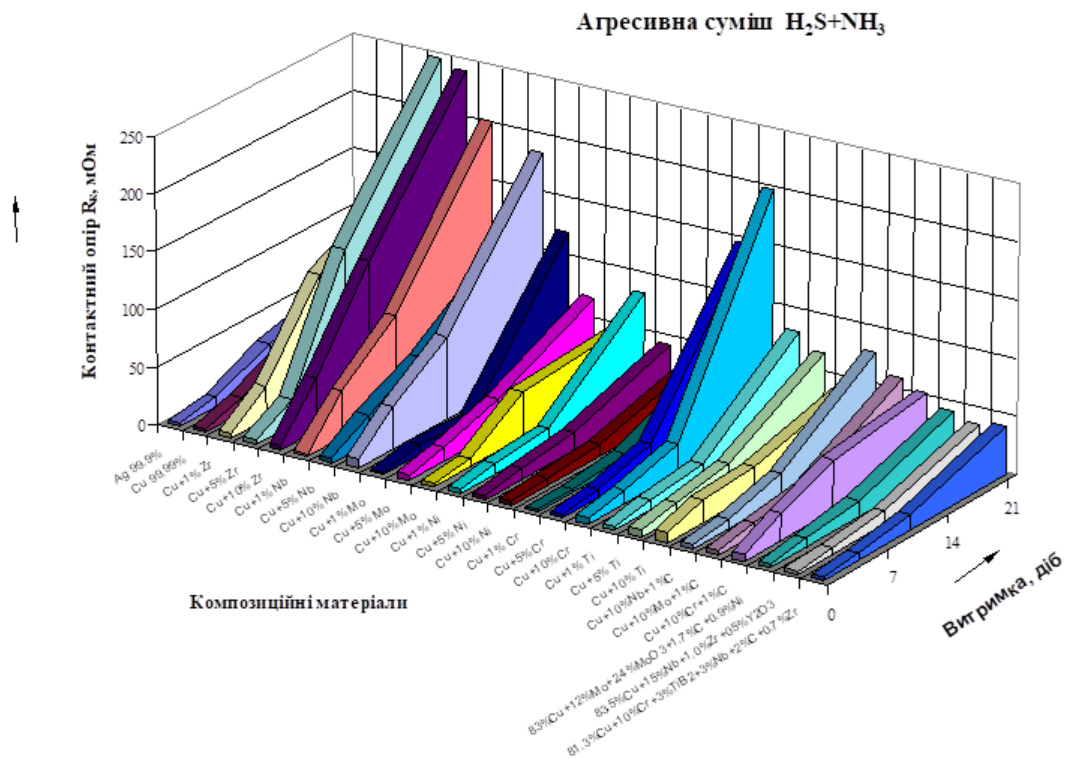
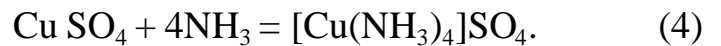


Рис. 3. Залежність перехідного контактного опору композиційних контактних матеріалів на основі міді в середовищі H_2S+NH_3 .

У продуктах взаємодії з H_2S+NH_3 зразка $Cu+10\%Zr$ спостерігаються дрібні зерна $CuSO_4 \cdot 7H_2O$, підфарбовані дисперсними включеннями Cu_2O і CuO , окремі зерна $Cu_4(OH)_6SO_4$, зафарбовані в смарагдово-зелений колір і жовті дрібні утворення

$\text{Cu}_2(\text{SO}_4)_\text{O}$, які мають високий коефіцієнт переломлення і колір яких змінений дисперсними включеннями оксидів, а також кристаліти вищенаведених аміакатів, переважно $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ і $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ з показниками переломлення, як і у відповідних сульфатів.

Корозійна взаємодія електроконтактних матеріалів із сумішшю агресивних компонентів $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$, більш інтенсивна, ніж в описаних вище середовищах. На поверхні зразків може виникати навіть ріст великих кристалів у вигляді пластин, особливо помітних у міді з домішками перехідних металів. Механізм впливу середовища $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$ багато в чому подібний до описаного для H_2S . При цьому перехід сульфату міді в сульфат тетраамінміді здійснюється шляхом безпосереднього насичення аміаком при кімнатній температурі:



Корозійні втрати від часу зображуються графічно $\Delta m = f(t_m)$, використовуючи чотири значення показника часу (0, 4, 10, 21 доби витримки) (рис. 4).

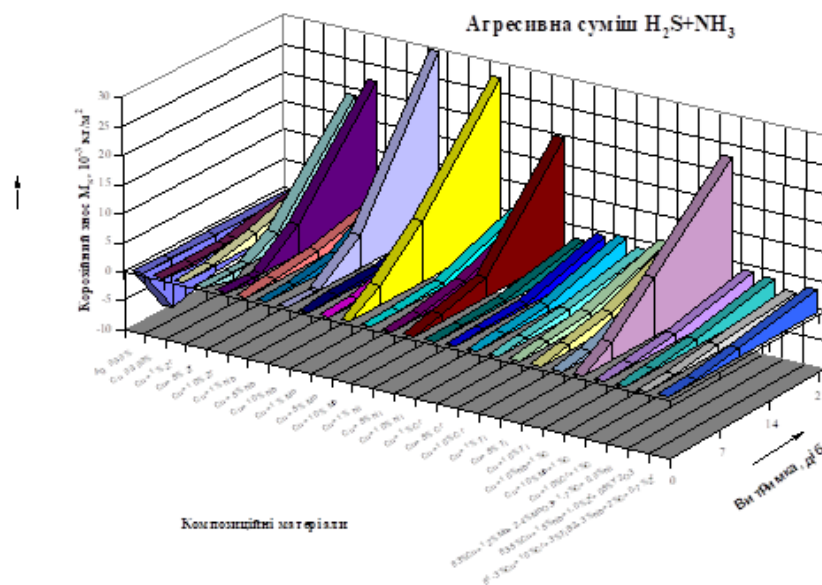


Рис. 4. Залежність корозійного зносу композиційних контактних матеріалів на основі міді в середовищі $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$.

За результатами досліджень за спеціальними таблицями побудовані залежності електроерозійного зносу серійних контакт-деталей пускачів ПМЛ із різних контактних матеріалів (рис. 5 і рис. 6). На рис.7 наведено фотографії мостикових контактів пускача ПМЛ-2100.

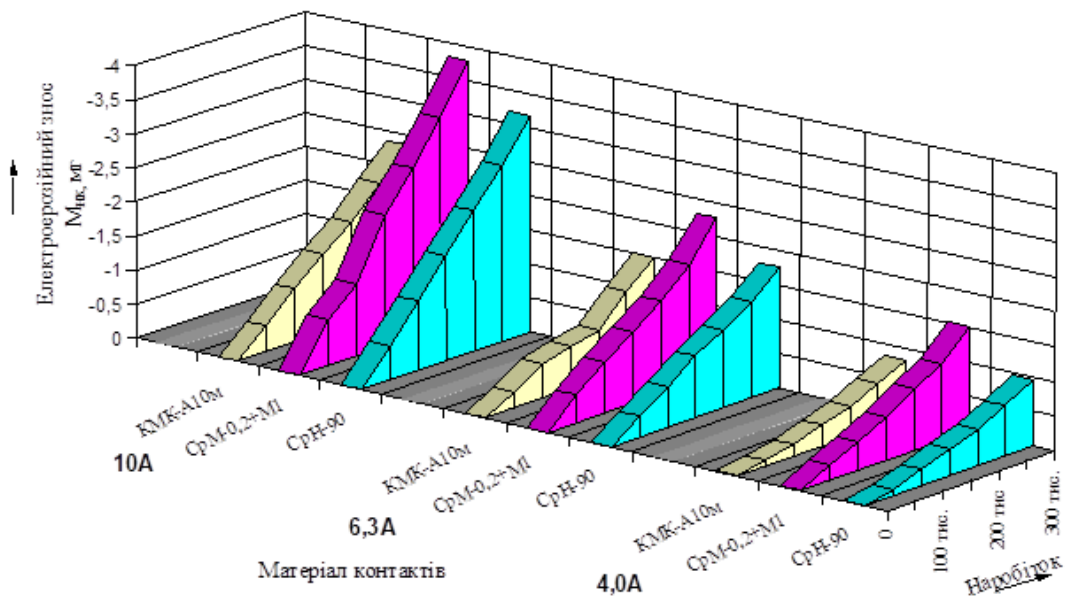


Рис. 5. Залежність електроерозійного зносу серійних нерухомих контакт-деталей пускачів ПМЛ

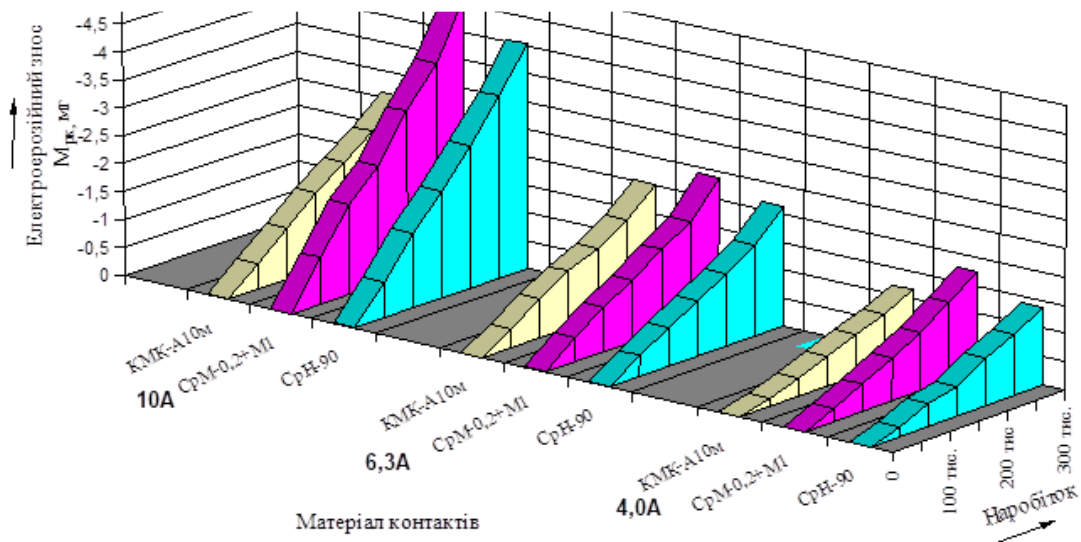


Рис. 6. Залежність електроерозійного зносу серійних рухомих контакт-деталей (мостиків) пускачів ПМЛ

При комутації змінного струму постійно змінюється полярність протікання струму через контакт і за експериментальними даними встановлено негативний (тобто зменшення маси) коефіцієнт інтенсивності електричної ерозії у нерухомих контакт-деталей (1, 2, 3, 4, 5, 6) і в рухомих (мостики 1-2, 3-4, 5-6). Але рухомі контакт-деталі зношуються інтенсивніше на 10÷27 %. Це явище характерне для

контактів змінного струму і його можна пояснити тим, що при випробуваннях температура рухомих мостиків була вища, ніж температура нерухомих контактів, на величину 25-30 °С. Маса рухомого контакту мостикового типу зменшується трохи більше, ніж маса нерухомих контактів, тому що процеси при дуговій ерозії супроводжуються інтенсивнішим випаровуванням і розбризкуванням матеріалу контакт-деталі з більш високою температурою.

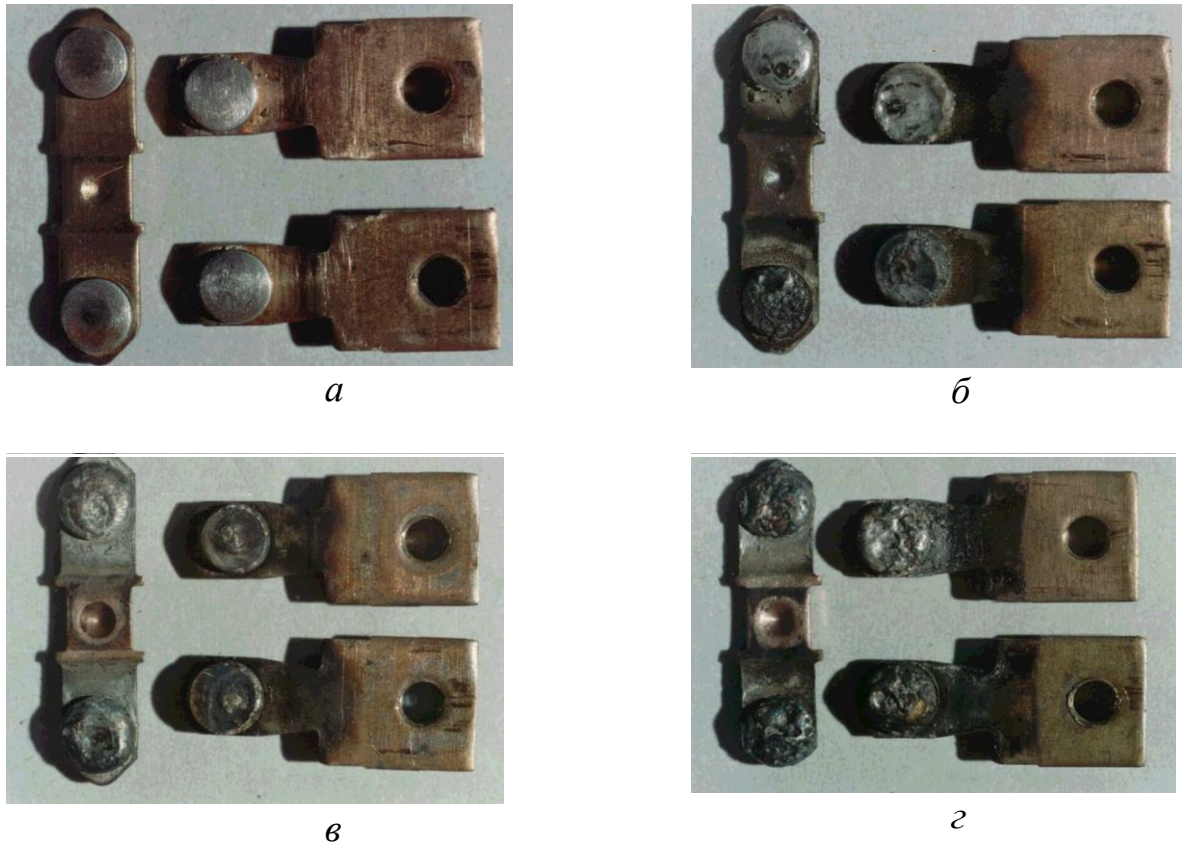


Рис.5. Зовнішній вигляд контактів пускача ПМЛ-2100O_x4 В після наробітку: а - 0 тис. комутаційних циклів; б - 150 тис. циклів; в – 300 тис. циклів; г – 500 тис. циклів. Категорія АС-3 (U=380В; I=25А). Матеріал КМК - А10м. Збільшення ×4

З наведених рисунків видно, що зі збільшенням комутуючого струму ерозійний знос збільшується і досягає свого максимального значення при струмі 10 А. Обумовлюється це тим, що із збільшенням струму в контактних процесах більш значну роль відіграють фактори плазмової дуги і збільшується дуговий ерозійний знос за рахунок зростання енергії електричної дуги. Причому на дугову ерозію суттєво впливає фазовий склад і структура контактного матеріалу, тому що дуговий канал закріплюється на структурних складових з низькою тепло- і електропровідністю.

Найбільшою ерозійною стійкістю володіють контакти КМК-А10м (пускач ПМЛ 2100.В). Стійкість матеріалу КМК-А10м вища на 13÷30 %, ніж контактів із матеріалу СрН-90 і на 35÷45 % вища, ніж у біметалевого контакту СрМ-0,2+М1. Висока електроерозійна стійкість контактів КМК-А10м в наших дослідженнях досягається структурою матеріалу і особливостями оксиду кадмію CdO. Також дуга горить в атмосфері парів кадмію та кисню, потенціал іонізації яких вище, ніж парів Ag. Термічна дія дуги викликає випаровування і розбризкування матеріалу контактів, поверхні контакт-деталей окислюються.

Висновки і перспективи. 1. Як показали досліди, корозивне газове середовище суттєво впливає на властивості електроконтактних матеріалів. Внаслідок різних хімічних процесів, а також формування твердих шарів різної природи і товщини, значно змінюється перехідний контактний опір зразків.

2. Встановлено, що найбільш впливає корозивне середовище на контакти, які працюють в суміші сірководню з аміаком, особливо при наявності вологи. Найбільшу тривкість мають контакти, випробувані в NH₃, CO₂.

3. Дослідження продемонстрували високу корозійну тривкість електроконтактних матеріалів на основі міді в NH₃ і CO₂ та значно менш задовільну в середовищах H₂S і H₂S+NH₃. Плівки, які утворювались на зразках контактних матеріалів №20-24 (табл. 1) мають майже однорідний за складом характер, а їх товщина збільшується зі збільшенням тривалості впливу середовища.

4. Контакти, які працюють при номінальних струмах до 10÷25 А, зазнають руйнування та ерозії в результаті впливу електричної дуги.

5. Встановлено лінійний закон ерозійного зношування контактів від величини сили струму та кількості комутаційних циклів, виявлено негативний коефіцієнт інтенсивності електричної ерозії в нерухомих і рухомих контакт-деталей. Рухомі контакти зношуються на 10÷27 % інтенсивніше.

6. Ерозійна стійкість контактів з матеріалу КМК – А10м на 13÷30 % вища, ніж в СрН-90 і на 35÷45% вища, ніж в СрМ-0,2+М1.

Список використаних джерел

1. Коробський В. В., Мрачковський А. М. Визначення величини ерозії контактів електромагнітних пускачів та реле. Вісник ХНТУ сільського господарства. Харків: Вид-во ХНТУ, 2010. Вип. 130. С. 125 – 128.
2. Korobskiy V. V., Mrachkovskiy A. M. New aspects of creation of environmentally friendly composite materials for contact systems of electric equipment in the agriculture sector: Volume 671, 2018 – Issue 1: 1th International Conference on Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials (ICEPOM-11): Part 2. Molecular Crystals and Liquid Crystals. Published online: 03 Jun 2019. P. 35 – 40. (<http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2018.1542083>).
3. Заблудський М. М., Наливайко В. А., Радько І. П., Окушко О. В., Радько І. В. Технології відновлення і зміцнення деталей електрообладнання з використанням композиційних матеріалів: монографія К.: НУБіП України, 2022. 268 с.
4. Машевський В. П., Корчемний М. О. Надійність і довговічність контактних систем низьковольтних апаратів. Київ: НТУУ "КПІ", 2006. 280 с.
5. Зубарев В. В. Дослідження електричних контактів для високочастотних комутаційних пристроїв. Харків: ХНУРЕ, 2015. 198 с.
6. Nalyvaiko V. A., Radko I. P., Okushko O. V. Study of the performance of copper-based composite materials in aggressive environments. International Journal of Electrical Materials. 2021. Vol. 10, Issue 2. P. 95–105.
7. Burkhardt S., Müller J. Advanced copper alloys for switching devices: Corrosion and wear properties. IEEE Transactions on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2016. Vol. 23, Issue 5. P. 411–420.
8. Zhang W., Li H. Development of environmentally friendly materials for electrical contacts. Journal of Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 58, Issue 12. P. 1435–1448.

References

1. Korobskiy, V. V., Mrachkovskiy, A. M. (2010). Vyznachennia velychyny erozii kontaktiv elektromahnitnykh puskachiv ta rele [Determination of the value of erosion of contacts of electromagnetic starters and relays]. Bulletin of KhNTU of Agriculture, 130, 125–128.
2. Korobskiy, V. V., Mrachkovskiy, A. M. (2019). New aspects of creation of environmentally friendly composite materials for contact systems of electric equipment in the agriculture sector. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 671(1), 35–40. <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1542083>
3. Zablodsky, M. M., Nalyvayko, V. A., Radko, I. P., Okushko, O. V., Radko, I. V. (2022). Tekhnolohii vidnovlennia i zmitsnennia detalei elektroobladnannia z vykorystanniam kompozytsiinykh materialiv [Technologies for the restoration and strengthening of electrical equipment parts using composite materials: monograph]. Kyiv: NUBiP of Ukraine, 268.
4. Mashevskiy, V. P., Korchemnyi, M. O. (2006). Nadiinist i dovhovichnist kontaktnykh system nyzkovoltnykh aparativ [Reliability and durability of contact systems of low-voltage devices]. Kyiv: NTUU "KPI", 280.

5. Zubarev, V. V. (2015). Doslidzhennia elektrychnykh kontaktiv dlia vysokochastotnykh komutatsiinykh prystroiv [Research of electrical contacts for high-frequency switching devices]. Kharkiv: KhNURE, 198.

6. Nalyvaiko, V. A., Radko, I. P., Okushko, O. V. (2021). Study of the performance of copper-based composite materials in aggressive environments. International Journal of Electrical Materials, 10(2), 95–105.

7. Burkhart, S., Müller, J. (2016). Advanced copper alloys for switching devices: Corrosion and wear properties. IEEE Transactions on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 23(5), 411–420.

8. Zhang, W., Li, H. (2020). Development of environmentally friendly materials for electrical contacts. Journal of Materials Science and Engineering, 58(12), 1435–1448.

STUDY OF RELIABILITY INDICATORS OF ELECTROMAGNETIC STARTERS ПМЖІ-2100

V. Korobskiy, V. Vasiuk, A. Kostenko

Abstract. *The replacement of standard silver-based contact components with experimental copper-based contact assemblies has been proposed. To assess the functionality and operational feasibility of the experimental contacts, climatic testing of the contact materials was conducted.*

Through the evaluation of changes in contact resistance and the mass of copper-based contact material samples with thermodynamically stable additives, along with petrographic analysis of their interaction products, the transition resistance and corrosion resistance of electrical contact materials in chemically active environments were assessed. The study demonstrated stable transition resistance and high corrosion resistance of the investigated copper materials in environments containing NH_3 and $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

To determine the performance of the starters, tests on switching wear resistance were conducted. These studies were performed for standard contact components of electromagnetic starters ПМЖІ-210004 and metal-ceramic contact components based on copper with metallic additives and defined thermodynamically stable compounds.

To enhance the reliability of the contact system of electromagnetic starters and relays as a whole, it is proposed to replace standard contact components with copper-based contact components.

Key words: *reliability of electromagnetic starters, copper-based contact materials, transition resistance, corrosion resistance, switching wear resistance, climatic testing.*