

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА
КОНТАКТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ІЗ АГРЕСИВНИМ
ОТОЧУЮЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ**

В.В. Коробський, кандидат технічних наук

О.О. Чорноволенко, 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 матеріалів в середовищах NH_3 і $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Для визначення працездатності пускачів були здійснені випробування на надійність контактування пускачів. Ці дослідження проведені для серійних контактних частин електромагнітних пускачів ПМЛ-110004 на основі срібла CrH-90 , CrM-0,2+M1 та металокерамічних контактних частин на основі міді з домішками металів та визначених термодинамічно стійких сполук. Контактні вузли пускачів, що виготовлені з експериментальних контактних матеріалів, пройшли кількарічні виробничі випробування в реальних сільськогосподарських умовах.

Ключові слова: *перехідний опір, контактна частина, контактний матеріал, кліматичні випробування, комутаційні випробування, корозійна тривкість, електричний апарат, надійність*

Актуальність. 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 [1, 2]. 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, ПМ, ПММ, ПМЕ, ПМА, ПАЕ виготовлені з матеріалу на основі срібла (СрН-90, СрМ-0,2+М1, СОК-15, КМК-А10м тощо).

Оскільки надійність пускачів з розробленими дослідними контактами передбачає збереження в часі параметрів, які характеризують властивість електромагнітних пускачів виконувати свої функції у всіх передбачених режимах і в жорстких умовах експлуатації (умови середовища технологічних тваринницьких приміщень), то показники надійності контролюються при всіх випробуваннях: при контролюванні функціонування пускача і при випробуванні на вплив зовнішніх факторів (контрольних випробуваннях). З метою скорочення часу і засобів випробування, застосовується одноступінчатий контроль, при якому проходить випробування одна вибірка (за результатами випробування якої приймають рішення про відповідність вимогам надійності).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. 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 щодо захисту від впливу навколишнього середовища, виходять з ладу до досягнення певного ресурсу зносостійкості, і це, в першу чергу, стосується контактної системи (до 30 % усіх відмов у пускачах) [3]. Сьогоднішня сучасна електротехнічна промисловість не випускає пускачі та реле для потреб агропромислового сектора [4].

З метою підвищення надійності контактної системи електромагнітного пускача і реле в цілому пропонується замінити серійні контактні частини на контактні частини на основі міді [5].

Мета дослідження – проведення порівняльних досліджень характеристик електромагнітних пускачів із серійною та експериментальною дослідною контактною частинами та виявлення впливу параметрів агресивного середовища на характер зміни перехідного опору контактних матеріалів та контактів пускачів.

Матеріали та методи дослідження. Авторами проведено випробування з визначення перехідного опору серійних контактних частин пускачів ПМЛ-1100О4

(виконання А, В і С; матеріал контакту СrН-90, СrМ-0,2+М1 відповідно) і пускачів ПМЛ-1100О4 з експериментальними мідним контакт-деталлями (Cu+Cr+TiВ₂+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 складали 1;5 і 10 ваг. % (табл. 1).

Ріст плівкового покриття фіксувався шляхом зміни перехідного контактного опору. Перехідний контактний опір і корозійна тривкість матеріалів оцінюється згідно шкали корозійної тривкості (п'ятибальна система) (табл. 1).

Випробування з визначення перехідного опору контакт-деталей пускачів проводяться в нормальному комутаційному режимі (категорія АС-3) за таких кліматичних умов: $t=25\pm 10\text{C}^\circ$, $\varphi=45\div 80\%$, $p=84\div 100$ 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, що виміряний вольтметром В7-35, мВ; I - струм, виміряний амперметром Э514, А.

Похибка при вимірюванні спаду напруги не перевищує 3 %. Допускається похибка вимірювання перехідного опору контакту в межах ± 10 % з імовірністю $P=0,95$. Розрахунок похибки перехідного опору δ проводиться за формулою [7]:

$$\delta = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_v^2 + \delta_A^2}, \quad (2)$$

де δ_v - похибка вольтметра, %; δ_A - похибка амперметра, %.

Випробувальна камера. Згідно нормативних вимог вибирається вид випробування 1.2.16: випробування на вплив атмосфери з корозійно-активними агентами, а також приймаються до уваги методи випробувань 2.3.7, 2.3.8, 2.3.15 [7]. Для моделювання заданої температури і вологості використовується кліматична камера, яка дозволяє регулювати температуру в межах від -25 °С до $+60$ °С і втоматично 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.

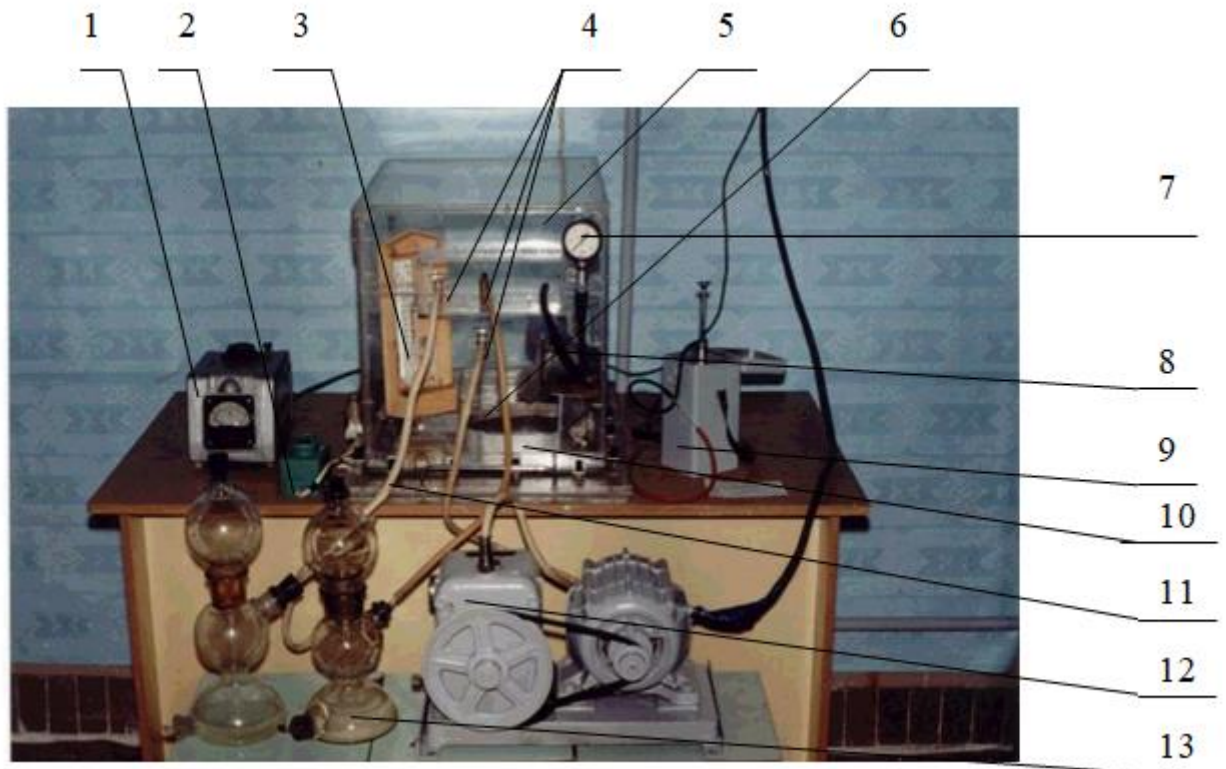


Рис. 1. Загальний вигляд спеціальної герметичної приставки до кліматичної камери (для проведення лабораторних кліматичних випробувань):

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

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 електровентильатора 8, який знаходиться безпосередньо над поверхнею води. 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 ВИП-2 (позиція 3). Електроventильатор рівномірно перемішує спеціальне середовище зі швидкістю до 10 мм/с і створює однакові умови по всьому об'єму ексикатора.

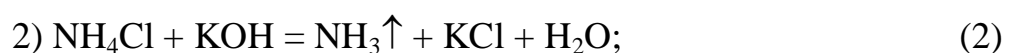
На передній вертикальній стінці приставки є декілька вентилів 4, які призначені для подачі корозивного середовища до приставки, приєднання електричного вакуум-нагнітача 12, газоаналізатора 9, для вирівнювання атмосферного тиску і випуску випробувального середовища. Для отримання агресивних компонентів 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 компонента 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 такими рівняннями:





Номинальне верхнє значення концентрації агресивних газів при впливі на контактні матеріали встановлюється за граничними робочими значеннями кліматичних факторів зовнішнього середовища 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 $\pm 10\%$ (допускається підтримання масової концентрації агресивного середовища в камері з точністю до $\pm 25\%$); при цьому застосовується метод фотоколориметричного визначення концентрації.

Витримка. До початку випробування, завдяки вимірам, 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:

$$\Delta m_s = \frac{m_{0\text{ кор}} - m_{1\text{ кор}}}{S}, \text{ кг/м}^2 \quad (3)$$

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, м².

Електричний контактний опір визначається методом малих ЕРС за формулою (1) згідно Стандарту 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.

Зразки матеріалів для визначення контактного опору мають форму циліндричних стрижнів діаметром 2,5 - 4,5 мм довжиною 15 - 20 мм; верхній рухомий контакт (анод) має контактну поверхню у формі напівкулі, нижній нерухомий (катод) - форму площини. Зразки контактних матеріалів для дослідження втрати маси мають форму пластини розмірами $50 \pm 10 \times 25 \pm 5 \times 1,5$ мм; кількість зразків пластин дорівнює трьом.

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

представляються дані по електричному контактному опору від часу перебування в спеціальному корозивному середовищі: $\Delta R=f(t_m)$.

Результати досліджень та їх аналіз. 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 найбільше впливає корозивне середовище на контакти, які працюють у суміші сірководню з аміаком, особливо за наявності вологи.

Найбільшу тривкість мають контакти, випробувані в NH_3 , CO_2 (табл. 1). У цьому випадку поверхня контактів вкрита налітом чорного кольору, який є оксидом міді CuO . Досить наглядно 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 ($R_k \leq 50$ мОм, рис. 3.а). 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.

Таблиця 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-тактний опір	корозійна тривкість	кон-тактний опір	корозійна тривкість	кон-тактний опір	корозійна тривкість	кон-тактний опір	корозійна тривкість
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 в 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 і інших перехідних металів, пояснюється утворенням у 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.

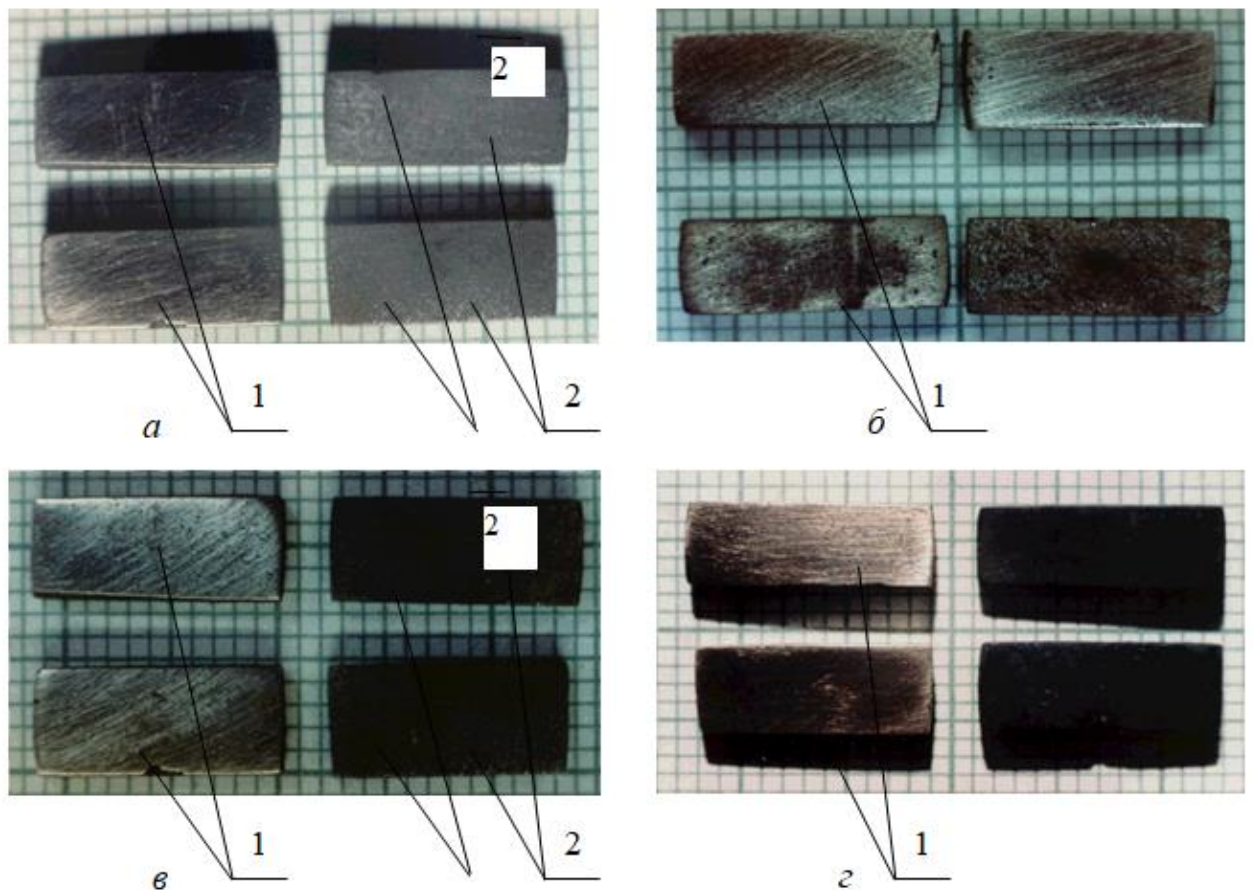
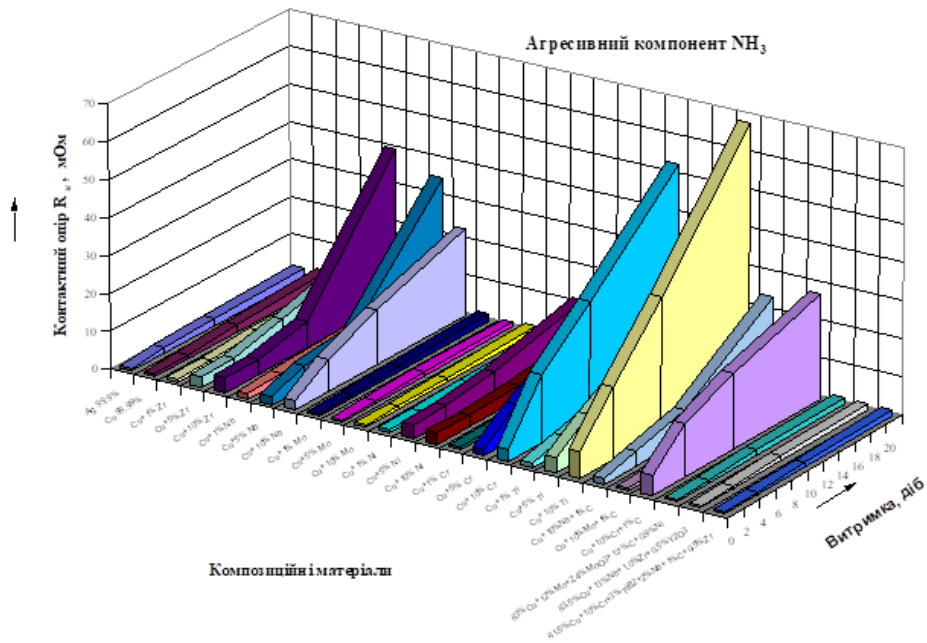


Рис. 2. Зразки контактного матеріалу до (1) і після 21 доби витримки (2) в корозивному середовищі, яке містить:

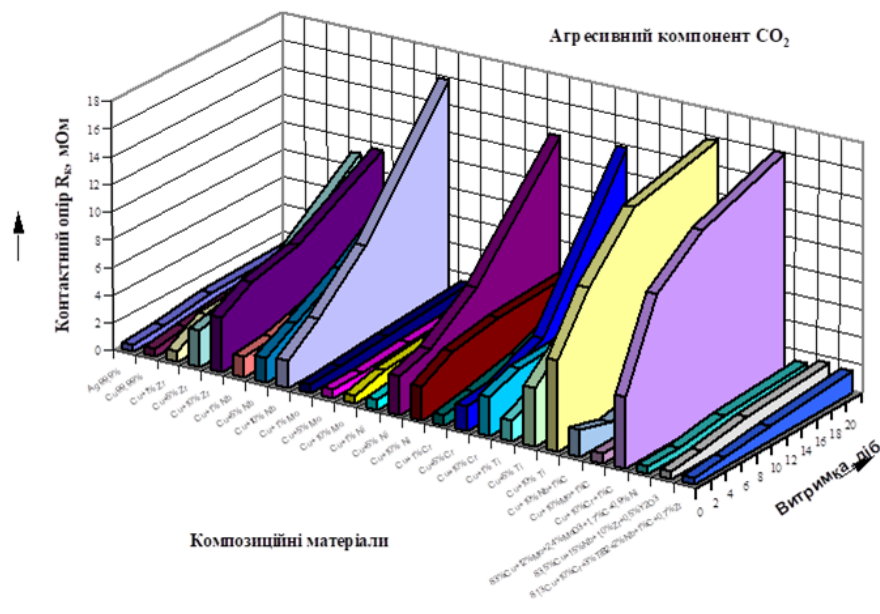
а – CO_2 ; *б* – NH_3 ; *в* – H_2S ; *г* – H_2S+NH_3 ; (верхні – $81,3\%Cu+10\%Cr+2\%TiB_2+3\%Nb+2\%C+0,7\%Zr$, нижні - Cu)

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

реакції тут менше, ніж у 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 $(CuOH)_2CO_3$.



a



б

Рис. 3. Залежність перехідного контактного опору композиційних контактних матеріалів на основі міді: а в середовищі компонента NH_3 ; б в середовищі компонента CO_2

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 (рис.3.б).

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 двохпереломленням (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 переломленням. 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 (рис. 4, а).

У випадку суміші $\text{H}_2\text{S}+\text{NH}_3$ контактний опір збільшується до 300 мОм і більше (рис.4, б). Тут корозійна тривкість контактів найменша в порівнянні з іншими спеціальними корозивними середовищами, а приріст маси зразка після досліду

становить $\sim 10 \text{ г/м}^2$. Петрографічно в продуктах взаємодії виявляються ті ж фази, що і в середовищі H_2S : Cu_2O , CuO , $\text{Cu}_2(\text{SO}_4)\text{O}$, $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$, $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, але також присутні і аміакати $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ і $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Сіль більш складніша: $[\text{Cu}_2(\text{SO}_4) \cdot (\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ та відповідний їй гідроксид, які виявлені раніше, не помічені.

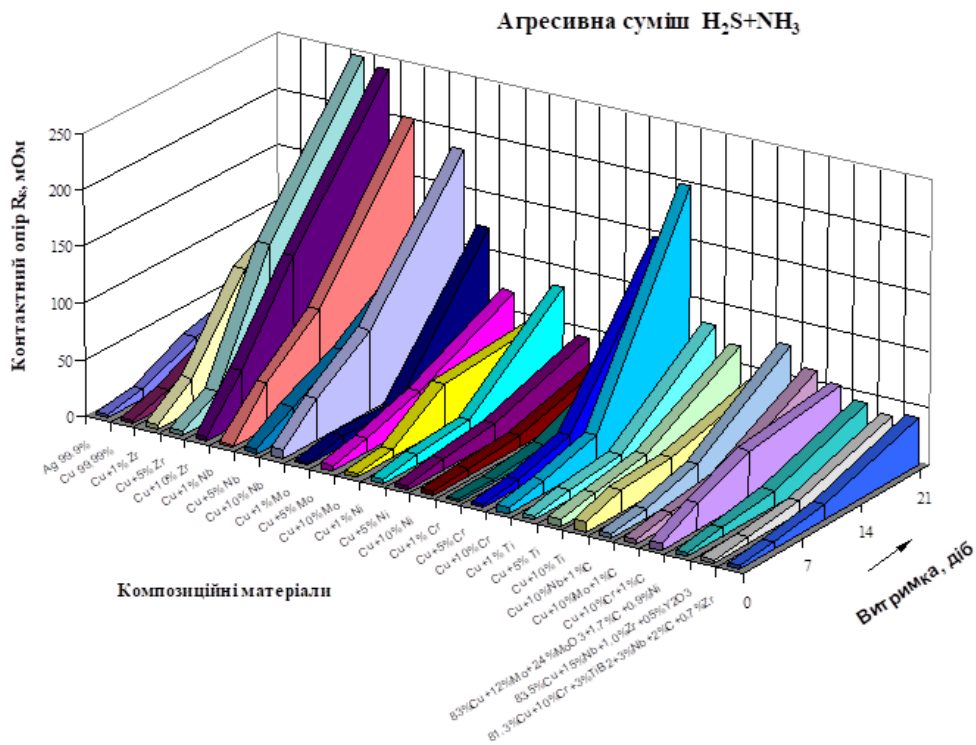
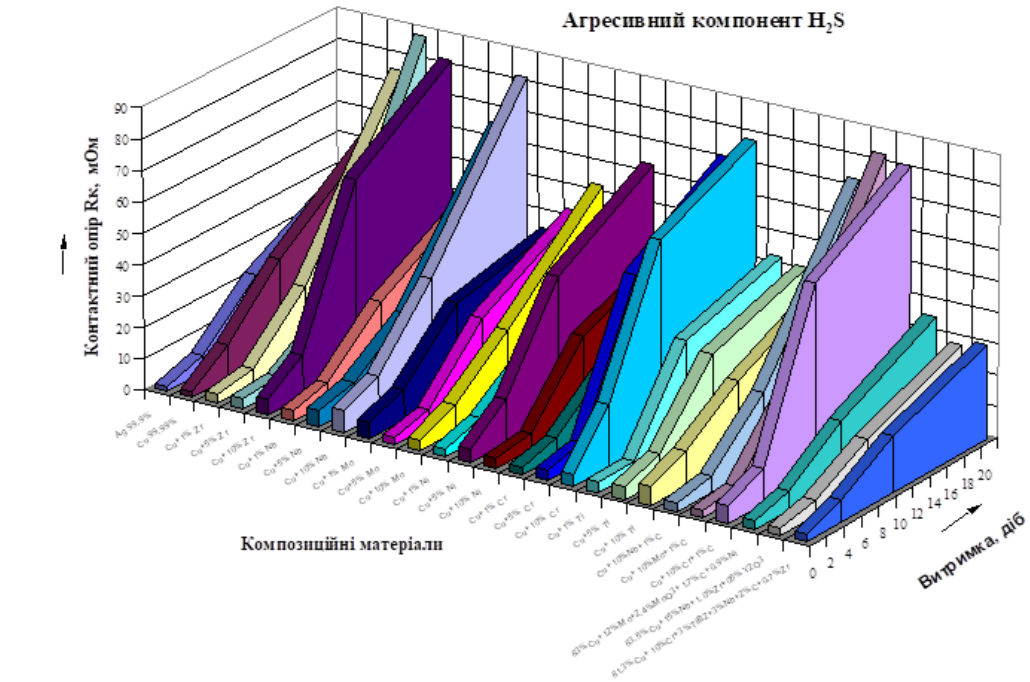
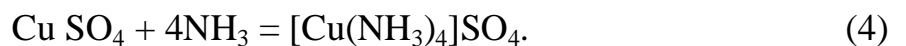


Рис. 4. Залежність перехідного контактного опору композиційних контактних матеріалів на основі міді:
 а в середовищі компонента H_2S ; б в середовищі суміші компонентів $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$

У продуктах взаємодії з $\text{H}_2\text{S}+\text{NH}_3$ зразка $\text{Cu}+10\%\text{Zr}$ спостерігаються дрібні зерна $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, підфарбовані дисперсними включеннями Cu_2O і CuO , окремі зерна $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$, 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:



Перехідний опір серійних та дослідних контактних пар визначався при загальній кількості циклів комутації 300 тис. Проводяться 100 замірів значень спаду напруги в кожній комутаційній серії з витримкою часу в замкнутому стані контактів 10 с. Отриманий масив даних за спадом напруги для серійних контактів марки $\text{CrM}-0,2+\text{M1}$ та дослідних $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+3\%\text{TiB}_2+3\%\text{Nb}+$

$+2\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$ оброблявся з використанням методів математичної статистики з застосуванням програми «Statistika». У результаті обробки отримані експериментальні залежності перехідного контактного опору від кількості циклів комутації, які наведені на рис. 5. Ці залежності апроксимувалися поліномом першого ступеня, в результаті були визначені такі вирази для математичного очікування контактного опору:

– для серійних контактів $\text{CrM}0,2+\text{M1}$:

$$R_c(n) = 14,22 + 0,191 \cdot n, \quad (4)$$

– середньоквадратична похибка апроксимації $E_c=2,141$;

– для дослідних контактів $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+3\%\text{TiB}_2+3\%\text{Nb}+2\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$:

$$R_d(n) = 21,84 + 0,128 \cdot n, \quad (5)$$

– середньоквадратична похибка апроксимації $E_c=1,855$.

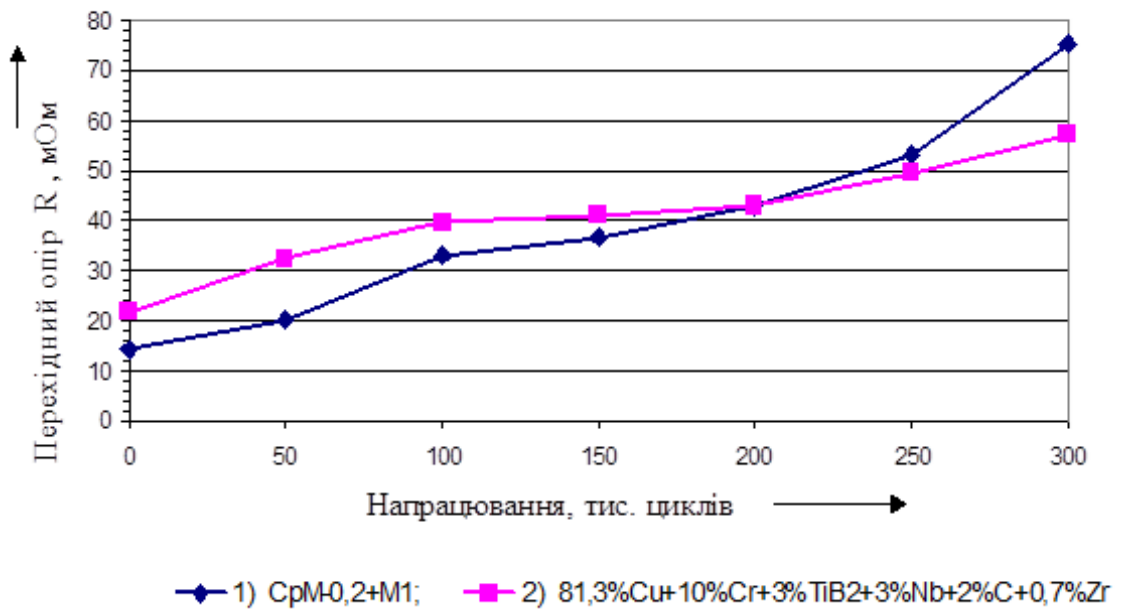


Рис. 5. Залежність перехідного опору контактів пускачiв ПМЛ-1100 О4 з серійними (1) та дослідними контактами (2) (випробувальне середовище: сумiш H_2S ($25\text{мг}/\text{м}^3$)+ NH_3 ($30\text{мг}/\text{м}^3$))

Дослідженнями з визначення контактного опору контактів при впливі на них середовища з хiмiчно-активними компонентами встановлено, що початкове значення перехідного опору контактів зростає iз збiльшенням часу витримки i кiлькостi циклiв комутацiї. Опiр серійних контактів $\text{CrM}-0,2+\text{M}1$ збiльшується майже в 5 разiв порiвняно з початковим, а дослідних - зростає повiльнiше, нiж у сiрбловмiстких матерiалiв, \approx в 2,7 рази. Це пояснюється тим, що граничний шар складається з плiвок, якi утворюються на контактах i мають однорiдний склад, а їх товщина зростає iз збiльшенням тривалостi впливу середовища. Подiбна плiвкова структура поверхнi контактування сприяє зниженню перехідного опору за рахунок подрiбнення локалiзованих частинок i встановлення надiйного металiчного контакту. Оксиднi плiвки мiдi, як вiдомо, утворюються i при кiмнатнiй температурi i товщина їх досягає не бiльше 5 мкм. Така плiвка захищає мiдь вiд подальшого окислення киснем i стабiлізує контактний опiр.

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 найбільше впливає корозивне середовище на контакти, які працюють у суміші сірководню з аміаком, особливо за наявності вологи. Найбільшу тривкість мають контакти, випробувані в NH_3 , CO_2 .

3. Дослідження продемонстрували високу корозійну тривкість електроконтактних матеріалів на основі міді в NH_3 і CO_2 та значно менш задовільну в середовищах H_2S і $\text{H}_2\text{S}+\text{NH}_3$. 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. При впливі корозивного середовища, що містить суміш газів $\text{H}_2\text{S}+\text{NH}_3$, опір серійних контактів CrM-0,2+M1 збільшується майже в 5 разів порівняно з початковим, а дослідних - зростає повільніше, ніж у срібловмістких матеріалів, \approx в 2,7 рази.

5. Для створення контактних матеріалів з необхідними робочими властивостями для пускачів сільськогосподарського призначення доцільно обирати композиційні матеріали на основі міді, компонентами яких є такі термодинамічні компоненти: Cr, Nb, Zr, Y_2O_3 , C, TiB_2 .

Список використаних джерел

1. Коробський В. В., Мрачковський А. М. Визначення величини ерозії контактів електромагнітних пускачів та реле. Вісник ХНТУ сільськогосподарства. Харків: Вид-во ХНТУ, 2010. Вип. №130. С. 125 – 128.

2. Korobskyi, 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. Заблодський М. М., Наливайко В. А., Радько І. П., Окушко О. В., Радько В. І. Технології відновлення і зміцнення деталей електрообладнання з використанням композиційних матеріалів: монографія. К.: НУБіП України, 2022. 268 с.
4. Клименко Б. В., Кохановський В. О. Огляд та перспективи розвитку матеріалів для контактів електромеханічних апаратів низької напруги. Електротехніка і електромеханіка. 2011. №4. С. 34 – 40.
5. Пат. 1790821 СРСР, МКІ⁵ Н 01 Н 1/02, С 22 С 9/00. Спечений електроконтактний матеріал на основі міді / Братерська Г.М., Коханівський С.П., Донцова Т.О., Наливайко В.А., Сагач М.Ф., Коробський В.В. (СРСР); заявник УСГА і ПІМ АН УРСР. – заявл. 22.05.1991. (для службового користування). Відкритим друком не опубліковано.
6. Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия: ГОСТ 2491-82 (СТ СЭВ 5535-86) – [Чинний від 1983-01-01]. М.: Изд - во стандартов, 1982. 22 с. (Міждержавний стандарт).
7. Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта и динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта: ГОСТ 24606.3-82 (СТ СЭВ 3985-83) [Чинний від 1984-01-01]. М.: Изд - во стандартов, 1983. 23 с. (Міждержавний стандарт).

References

1. Korobskiy, V.V. (2010). Vznachennya velichini eroziyi kontaktiv elektromagnitnih puskachiv ta rele [Determination of the amount of contact erosion of electromagnetic starters and relays]. *Visnik HNTU silskogo gospodarstva*, 130, 125 – 128.
2. Korobskiy, V.V., Mrachkovskiy, A.M. (2018). 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 June 2019, 35 – 40. (<http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2018.1542083>).
3. Zabldoskiy, M.M., Nalyvaiko, V.A., Radko, I.P., Okushko, O.V., Radko, I.V. (2022). Tehnologiyi vldnovlennya ta zmitsnennya detaley elektroobladnannya z vikoristannyam kompozitsiynih materlalliv: monografiya [Technologies of recovery and strengthening of parts of electrical equipment using composite materials: monograph]. / Kyiv, NULES Ukrainy, 268.
4. Klimenko, B.V., Kochanovskiy, V.O. (2011). Ohliad ta perspektyvy rozvytku materialiv dlia kontaktiv elektromekhanichnykh aparativ nyzkoi napruhy. [Review and prospects of materials development for contacts of electromechanical devices of low voltage]. *Electrical engineering and electromechanics*, 4, 34 – 40.
5. Braterskaya, G.M., Kochanovskiy, S.P., Dontsova, T.O., Nalyvayko, V.A., Sagach, M.F., Korobskiy, V.V. Spechenyi material dlia elektrychnykh kontaktiv na osnovi midi. [Sintered electrocontact material based on copper]. Patent of the USSR, no. 1790821, МКІ⁵ N 01 N 1/02, С 22 С 9/00. The applicant of USHA and IPM of the Academy of Sciences of the USSR. – stated. May 22, 1991 (restricted). Open print not published.

6. GOST 2491-82 (ST SEV 5535-86). (1982). Puskateli elektromagnitnyie nizkovoltnyie. Obschie tehicheskie usloviya [Electromagnetic low-voltage starters. General technical conditions]. Moskow. Izdatelstvovo standartov, 22.

7. GOST 24606.3-82 (ST SEV 3985-83). (1983). Izdeliya kommutatsionnye. ustanovochnye i soediniteli elektricheskiye. Metody izmereniya soprotivleniya kontakta i dinamicheskoy i staticheskoy nestabilnosti perekhodnogo soprotivleniya kontakta. [Switching products, installation and electrical connectors. Methods for measuring contact resistance and dynamic and static instability of contact resistance.]. Moskow. Izdatelstvovo standartov, 22.

STUDY OF TRANSIENT RESISTANCE OF CONTACT MATERIALS AND CONTACTS OF ELECTRICAL DEVICES DURING INTERACTION WITH AGGRESSIVE ENVIRONMENT

V. Korobskiy, O. Chornovolenko

Abstract. *It is proposed to replace serial contact parts based on silver with experimental contact units based on copper. Climatic tests of contact materials were carried out to determine the performance and production operation of experimental contacts.*

As a result of the change in contact resistance and mass of samples of copper-based contact materials with thermodynamically stable impurities and on the basis of petrographic analysis of their interaction products, transient resistance and corrosion resistance of electrical contact materials in chemically active environments were evaluated. Stable transient resistance and high corrosion resistance of the studied materials in NH_3 and CO_2+H_2O environments are shown.

To determine the operability of the starters, tests were carried out on the reliability of contact of the starters. These studies were carried out for serial contact parts of PML-110004 electromagnetic starters based on silver - CpH-90, CpM-0.2+M1 and metal-ceramic contact parts based on copper with metal impurities and defined thermodynamically stable compounds. Contact units of the starters, made of experimental contact materials, have passed several years of production tests in real agricultural conditions.

The reliability of the electrical contact is largely determined by the components that make up its composition, the structure and properties of the surface layers, which are formed as a result of erosion and transfer of the contact material in the electric arc. The main component for the contact materials of the most common electromagnetic starters is silver. Corrosion of the working surfaces of the contacts of the starters, which occurs under the influence of chemically active impurities in the environment, is also one of the main factors of wear and failure. Contacts of PML, PM, PMM, PME, PMA, PAE starters are made of silver-based material (CpH-90, CpM-0.2+M1, COK-15, KMK-A10M, etc.).

Since the reliability of starters with developed test contacts involves the preservation over time of the parameters that characterize the ability of electromagnetic starters to perform their functions in all prescribed modes and in harsh operating conditions (environmental conditions of technological animal husbandry premises), the reliability indicators are controlled during all tests: when monitoring the functioning of the starter and when testing for the influence of external factors (control tests). In order to reduce the time and means of testing, one-stage control is used, in which one sample is tested (based

on the results of the test, a decision is made about compliance with reliability requirements).

As a rule, the technological equipment of livestock farms and complexes mainly includes electromagnetic starters of general industrial purpose of wear resistance class B, B. Such starters are unsuitable for long-term operation in specific conditions of agriculture, as they do not meet the requirements for protection against environmental influences, fail before reaching a certain resource of wear resistance, and this primarily concerns the contact system (up to 30% of all starter failures). Today's modern electrical engineering industry does not produce starters and relays for the needs of the agro-industrial sector.

In order to improve the reliability of the contact system of the electromagnetic starter and relay in general, it is suggested to replace the serial contact parts with copper-based contact parts.

The aim of the study –carrying out comparative studies of the characteristics of electromagnetic starters with serial and experimental test contact parts and the identification of the influence of aggressive environment parameters on the nature of changes in the transient resistance of contact materials and contacts of starters.

Key words: *transient resistance, contact part, contact material, climatic tests, switching tests, corrosion resistance, electrical apparatus, reliability*