

КОРОЗИЙНА ТА ЕРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ КОНДЕНСОВАНИХ З ПАРОВОЇ ФАЗИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ Й МОЛІБДЕНУ

І.М. Гречанюк¹, В.Г. Гречанюк²

¹НВП «ЕЛТЕХМАШ», 21011, м. Вінниця, вул. Ватутіна, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

²Київський національний університет будівництва та архітектури,
03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

Розглянуто корозійну та ерозійну стійкість композиційних матеріалів на основі міді і молібдену, які використовуються в якості контактних матеріалів. Досліджено, що введення в систему Cu–Mo цирконію і ітрію (матеріал МДК-3: Cu–(10...12 %) Mo–(0,2 %) Zr, Y) сприяє підвищенню корозійної стійкості на 20 %, а глибинний показник корозії знижується до 0,02 г/(м²·р.). Показано, що залежність зміни температури контактів від контактної опору носить лінійний характер, чим вищий контактний опір, тим інтенсивніше зростає температура контактів. Встановлена залежність контактної опору контактів, виготовлених із матеріалів МДК-3 та Ag–CdO, від кількості комутаційних циклів. Проведена порівняльна характеристика контактів із срібломісних матеріалів і контактних матеріалів з МДК-3 та показана перевага останніх. Бібліогр. 9, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: композиційні матеріали; корозійна стійкість; контактний опір; контактні матеріали; дисперсно-зміцнені матеріали

Конденсовані з парової фази композиційні матеріали (ККМ) Cu–Mo знайшли практичне застосування при виготовленні електричних контактів і електродів [1, 2]. Структура, фазовий склад та механічні властивості ККМ Cu–Mo описані в роботах [3, 4].

Однією з головних причин обмеженого застосування електроконтактних матеріалів, що не мають у своєму складі срібла чи інших благородних металів, є їх швидке корозійне й ерозійне руйнування при роботі в окисних середовищах в умовах високих температур.

Корозійна й ерозійна стійкість пов'язана з утворенням і руйнуванням плівок на робочій поверхні контакту та з переносом матеріалу. Утворенню плівок сприяють дугові розряди при комутації контактів, але плівки можуть виникати і на розімкнутих контактах.

У повітряних вимикачах електроерозійний знос контактів супроводжується взаємодією матеріалу поверхні контактів з високотемпературними іонізованими газовими потоками, особливо сильними при гасінні дуги стисненим повітрям. Потік стиснутого повітря створює різку зміну температур і викликає значні термічні напруження в робочому шарі контактів, що призводять до розтріскування, викиду і віднесення твердих відірваних часток поверхні з розплавлених і розм'якшених зон у міжконтактний проміжок. Крім фізичних процесів, що мають місце під впливом електричної дуги, в робочому шарі на поверхнях контактів і в міжконтактному зазорі протікають хімічні процеси, які викликають виникнен-

ня нових сполук — продуктів взаємодії матеріалу контакту і навколишнього середовища. Умови протікання хімічних реакцій у даному випадку особливі, тому що взаємодіють іонізовані гази, які знаходяться в складі плазми стовпа дуги та у навколишньому просторі, і матеріал контактів — у паровій і конденсованій фазах. Продукти цієї взаємодії (оксиди, нітриди й інші) накопичуються на поверхні контактів, сплавляються один з одним, утворюють більш-менш щільні плівки, що призводить до збільшення перекладного опору контактів. При відсутності електричних розрядів механізм утворення плівок простий. Молекули навколишніх газів і пари адсорбуються поверхнею контакту; іони металу звільняються з просторових решіток, вступають у взаємодію з адсорбованими іонами газу і утворюють плівки, що рівномірно покривають поверхню контакту.

При наявності електричних розрядів механізм утворення плівок ускладнюється. Під впливом високої температури розрядів виникають змішані оксиди і нітриди, що утворюють нерівномірні за товщиною плівки, локалізовані поблизу місць розрядів. Наступні розряди можуть викликати часткове розкладання плівок і очищення контактної поверхні, але в більшості випадків швидкість утворення плівок вища за швидкість очищення навіть на контактах із благородних металів.

Плівки оксидів за електричними властивостями близькі до ізоляторів. Так, електропровідність оксидів Cu₂O і CuO, які утворюються при роботі контактів на робочій поверхні, у 10¹¹ і 10⁶ разів нижча ніж у міді. Тому при замиканні контактів, покритих такими плівками, проходження струму можливо в результаті електричного пробоя, фітингу і механіч-

І.М. Гречанюк — <https://orcid.org/0000-0002-2609-6018>

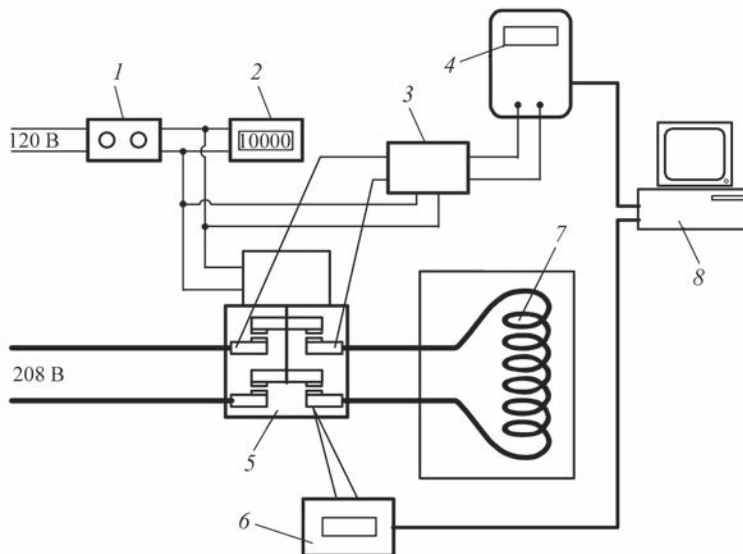


Рис. 1. Схема стенду для випробування контактів: 1 — реле включення/виключення циклів; 2 — лічильник кількості циклів; 3 — ізоляційне реле; 4 — показник; 5 — контактор; 6 — відліковий пристрій; 7 — навантаження при тестуванні; 8 — реєструючий пристрій

ного роздавлювання плівки. Роздавлювання і руйнування таких плівок можливо в присутності твердих металів, наприклад вольфраму або молібдену, які допускають більший контактний тиск.

Методи дослідження. Для встановлення можливості роботи контактів із композиційних матеріалів на основі міді і молібдену, одержаних способом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі, в повітряному середовищі в режимі вимикання були проведені дослідження корозійної стійкості гравіметричним методом [5].

Оцінка комутаційної здатності контактів проводилась з використанням стендових і натурних випробувань. Стендові випробування зазвичай здійснюються в умовах, близьких до натурних. Випробування матеріалів Cu-(8...12 мас. %) Mo-(0,2 мас. %) Zr, Y (МДК-3) [2] проводили в американській компанії «Ashurst Technology Group» на спеціально сконструйованому для цієї мети стенді, схема якого наведена на рис. 1.

Результати досліджень та обговорення. Дослідження роботи композиційних матеріалів Cu-Mo у нейтральному повітряному середовищі в режимі включення/виключення (130000 циклів, $I = 20$ А, $U = 220$ В) у порівнянні з традиційними системами дали позитивні результати. На рис. 2 наведена топографія поверхні на зразках Ag-CdO і Cu-Mo після відповідних випробувань.

Як видно з рис. 2, характер руйнування поверхневого шару, що спостерігається у композиційних матеріалах Cu-Mo, отриманих за допомогою електронно-променевої технології, і у матеріалі Ag-CdO, одержаного методом порошкової металургії, подібний. Разом з тим пошкодження поверхневого шару матеріалу Ag-CdO значно більші. На фотографіях видно досить великі області викиду частинок срібла з поверхні контакту.

При експлуатації контактів Cu-Mo у повітряному середовищі при температурах вище 300 °С на робочій поверхні утворюються складні шпінелі $\text{CuO} \cdot \text{MoO}_3$ і $3\text{CuO} \cdot \text{MoO}_3$. Сполука $\text{CuO} \cdot \text{MoO}_3$ має полі-

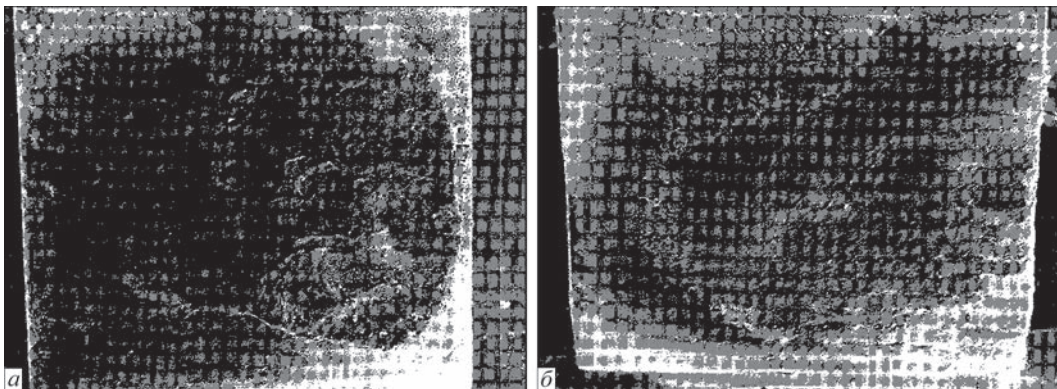


Рис. 2. Топографія поверхні після 130000 циклів включення/виключення: а — система Ag-CdO; б — композиційний матеріал Cu-Mo

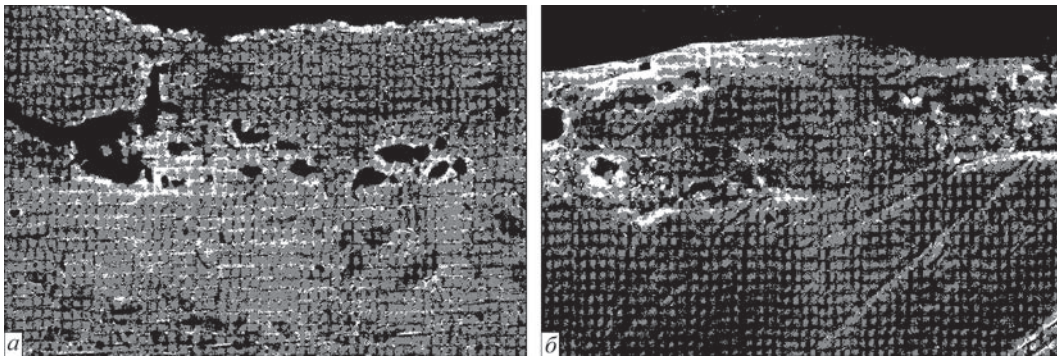


Рис. 3. Електроерозійні пошкодження при роботі електричних контактів: *а* — система Ag–CdO; *б* — композиційний матеріал Cu–Mo

морфне перетворення при 550 °С, яке відбувається зі зміною об'єму, що призводить до їх руйнування і сколювання з робочої поверхні контактів, оголення нових ділянок й інтенсифікації процесів окиснення.

Негативна дія плівок зменшується якщо подібні сполуки нестійкі, легко випаровуються, крихкі і легко віддаляються при контактному натисканні, при взаємному прокачуванні деталей чи під напором струменя повітря при дугогасінні.

На рис. 3 показано електроерозійний знос композиційного матеріалу Cu–Mo і традиційної системи Ag–CdO, що спостерігається при роботі електричних контактів, обумовлений дією високотемпературних іонізованих газових потоків, які виникають при гасінні дуги стисненим повітрям.

Темні ділянки поверхні в наведених електронно-графічних структурах композиційного матеріалу Cu–Mo і матеріалу Ag–CdO, одержаного методом порошкової металургії, відображають корозійні пошкодження, за рахунок яких підвищується питомий опір матеріалу в місті контакту, що у свою чергу також сприяє руйнуванню поверхні. Якщо порівняти пошкодження Cu–Mo із пошкодженнями контактів, до складу яких входить срібло, то видно, що для композиційного матеріалу системи Cu–Mo утворення областей корозійного руйнування істотно скорочується, а їхні розміри зменшуються. Виникнення великих дефектів обумовлено, насамперед, руйнуванням ділянок, що містять мідні включення, які утворилися в результаті краплинного переносу металу.

Про різний характер руйнування поверхневого шару свідчать також глибина і характер пошкоджень поверхневого шару зазначених матеріалів. Для зразків Ag–CdO характерне утворення крихкого шару, що легко відшаровується від поверхні матеріалу. Поверхневий шар конденсованих матеріалів Cu–Mo має більш щільну структуру і його відшаровування від непошкоджених ділянок відбувається не так інтенсивно, що, ймовірно, обумовлено розходженнями в структурі зазначених матеріалів.

Ступінь руйнування поверхні залежить від способу одержання матеріалів, із яких виготовляються контакти. При використанні методів порошкової металургії для виготовлення контактів із матеріалу Ag–CdO при циклах включення/виключення і виникненні електричної дуги спостерігається випаровування великих частинок легкоплавкої фази і виникнення дефектів пітінгової корозії. Конденсовані матеріали, на відміну від матеріалів, одержуваних традиційними методами порошкової металургії, мають шарувату структуру, що виключає можливість глибокого руйнування матеріалу.

Корозійна й ерозійна стійкість залежить від хімічного складу конденсованих матеріалів. Проведені гравіметричні дослідження конденсатів Cu–Mo показали, що введення молібдену до 5 мас. % у мідну матрицю практично не впливає на корозійну стійкість композиційного матеріалу Cu–Mo у порівнянні з чистою міддю. При більш високих концентраціях молібдену (до 12 %) спостерігається зниження корозійної стійкості приблизно до 20 %, що обмежує використання контактних матеріалів Cu–Mo в окисному середовищі [6].

Корозійні та ерозійні процеси в значній мірі гальмуються шляхом додаткового легування композиційних матеріалів Cu–Mo іншими елементами. З цього погляду дуже перспективним для електричних контактів є запропонований у даній роботі конденсований матеріал Cu–Mo–Zr–Y (МДК).

Гравіметричні дослідження показали, що додаткове легування мідної матриці цирконієм і ітрієм у кількості до 0,2 мас. % кожного із компонентів дозволило підвищити корозійну стійкість композиційних матеріалів на 20 %. Підвищення корозійної стійкості при додаванні до матеріалу ітрію і цирконію пов'язано з екрануючою дією частинок ітрію і цирконію, які розташовуються на границі кристалітів. При цьому площа контактів анодної й катодної зон зменшується і корозійні процеси, які під впливом навколишнього середовища протікають по електрохімічному механізму, гальмуються.

Склад оксидної плівки, яка утворюється на поверхні зразків при роботі композиційного матеріалу в окисному середовищі, змінюється. На відміну від композитів Мо–Cu у сконденсованих матеріалах, що містять цирконій і ітрій, плівки формуються на основі складних шпинелей типу: $\text{CuO} \cdot \text{MoO}_3 \cdot \text{ZrO}_2$, $\text{CuO} \cdot \text{MoO}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{CuO} \cdot \text{MoO}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$. Подібні сполуки не мають поліморфних перетворень, відрізняються досить високою електропровідністю й адгезією з основним матеріалом.

Базуючись на результатах гравіметричних досліджень, були розраховані показники корозійної стійкості. Розрахунок глибинного показника корозії проводився за формулою:

$$H = (K_{\text{ваг}} \cdot 8,76) / \rho_{\text{мет}}, \text{ мм/рік},$$

де ρ — густина матеріалу; $K_{\text{ваг}}$ — ваговий показник корозії, який описується таким чином:

$$K_{\text{ваг}} = (m_0 - m_1) S_0 \tau,$$

де m_0 , m_1 — початкова й кінцева маса зразків; S_0 — площа поверхні зразків; τ — час корозійних випробувань в дистильованій воді, як більш агресивному середовищі в порівнянні з водопровідною.

При зростанні вмісту молібдену з 1,1 до 14 % глибинний показник корозії збільшується з 0,007 до 0,050 г/(м²·рік), причому в динамічному режимі ці зміни виражені більшою мірою (таблиця).

При введенні в систему Cu–Mo цирконію й ітрію в кількості до 0,2 % спостерігається значне підвищення корозійної стійкості у водному середовищі. Глибинний показник корозії для системи Cu–(10...12 %) Mo–(0,2 %) Zr, Y (МДК-3) знижується до 0,020 г/(м²·рік). Структура поверхневого шару практично не змінюється.

Випробування ККМ на основі міді і молібдену проводили в умовах: струм — 19 А, напруга — 208 В, тривалість циклу випробувань по 3 секунди включено та виключено. Кількість циклів 130000. Випробування проходили при кімнатній температурі й вологості, що не перевищує 65 %. При цьому визначили зміну контактної опору залежно від кількості циклів і зміну температури контактів — від контактної опору.

На рис. 4 наведена залежність зміни контактної опору контактів, виготовлених із матеріалу МДК-3 порівняно зі стандартними контактами Ag–CdO, виготовленими методами порошкової металургії.

Як видно з рис. 4, початковий контактний опір контактів, виготовлених з матеріалів МДК-3 і Ag–CdO, близький. Порівнянні значення контактної опору контактів спостерігаються тільки до 400 циклів випробувань. Потім має місце збільшення контактної опору зі значення $1,4 \cdot 10^{-3}$ Ом при 400 циклах випробувань до $8 \cdot 10^{-3}$ Ом при

Глибинні показники корозії ККМ в дистильованій воді, г/(м²·рік)

Склад конденсату	Статичний режим	Динамічний режим
100 % Cu	0,007	0,017
Cu–1,1 % Mo	0,077	0,021
Cu–2,3 % Mo	0,0080	0,023
Cu–5,4 % Mo	0,0095	0,025
Cu–10,5 % Mo	0,0310	0,040
Cu–14 % Mo	0,0210	0,050
Cu–5,4 % Mo–0,2 % Y–0,2 % Zr	0,0075	0,018
Cu–10,5 % Mo–0,2 % Y–0,2 % Zr	0,0080	0,020

3000 циклів випробувань контактів, виготовлених з матеріалу МДК-3.

Подальше збільшення кількості циклів випробувань до 200000 приводить до незначного підвищення контактної опору до $10 \dots 11 \cdot 10^{-3}$ Ом. В той же час контактний опір композицій Ag–CdO протягом усього періоду випробувань залишається практично незмінним і знаходиться на рівні $1,6 \dots 1,8 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Залежність зміни температури контактів від контактної опору носить лінійний характер, чим вищий контактний опір, тим інтенсивніше зростає температура контактів. Тому при підготовці технічних рекомендацій по застосуванню матеріалів МДК необхідно враховувати максимально допустиму температуру контактів у комутаційних апаратах.

Якісно подібна залежність контактної опору й контактної температури отримана при випробуванні електромагнітних реле ПЕ-38У3. Номінальний робочий струм становить 4 А, напруга — 12 В. Випробування проводили в нормальних кліматичних умовах за ГОСТ 2933–83, ГОСТ 12434 і технічних умовах ЕВУН647612.002 ТУ, ІЕУВ. 647 У16.003 ТУ. Метою випробувань була оцінка можливості заміни контактних матеріалів на основі срібла на контактні матеріали на основі МДК.

На рис. 5 наведені криві залежності середніх значень опору розмикаючих контактів реле часу

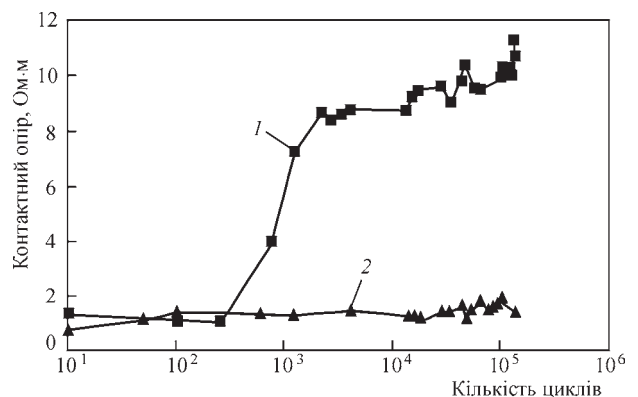


Рис. 4. Залежність контактної опору контактів, виготовлених із матеріалів МДК-3 (1) та Ag–CdO (2), від кількості комутаційних циклів

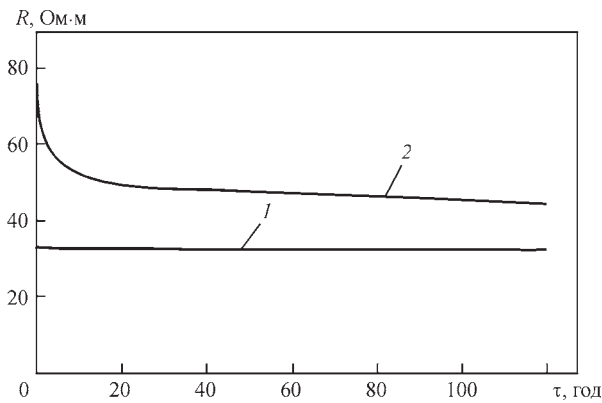


Рис. 5. Залежність середніх значень опору розмикаючих контактів реле часу ВС-43 від часу, який пройшов після включення реле при струмі 4 А: 1 — срібло Ср999; 2 — МДК-3

ВС-43 від часу, що пройшов після включення реле при струмі 4 А. Контакти з матеріалу Ср999 мають стабільне значення опору в часі (крива 1, $R = 33 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Середні значення опорів розмикаючих контактів з матеріалу МДК (крива 2) різко зменшуються в перші 10 год. випробувань з 76 до 45 Ом·м і в подальшому практично не змінюються протягом всього терміну випробування.

Якісно подібні залежності отримані при порівняльних випробуваннях контактів із срібла Ср999 і МДК-3 в електромагнітних реле ПЕ-38 (рис. 6).

На рисунку наведені криві залежності середніх значень опору розмикаючих контактів електромагнітних реле ПЕ-38 від часу, що пройшов після включення реле при струмі 4 А.

Середні значення опору контактної пари з матеріалів СрКдИн і Ср999 (крива 1) протягом 120 год. зменшилося з 20 до 15 Ом·м, а контактів із матеріалу МДК (крива 2) протягом 120 год. зменшилося з 25 до 7 Ом·м. Контактна пара МДК-3–МДК-3 має практично в два рази менший опір у порівнянні з парою СрКдИн–Ср999. Як показали рентгенографічні і електронно-мікроскопічні дослідження, на поверхні контактів із матеріалу МДК утворюється крихка та порувата плівка із оксидів молібдену та міді, яка легко відшаровується при включенні/виключенні контактної пари, тобто спостерігається самоочищення композитів Cu–Mo від оксидних плівок.

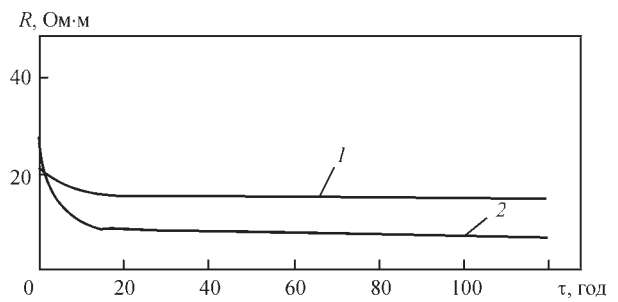


Рис. 6. Залежність середніх значень опору розмикаючих контактів реле ПЕ-38 від часу, який пройшов після включення реле при струмі 4 А: 1 — пара матеріалів СрКдИн и Ср999; 2 — МДК-3

Періодичне зволоження (імітація конденсації вологи на контактах протягом 120 год. при протіканні струму 4 А) показало, що опір контактних ланцюгів як із матеріалу Ср999, так і МДК не змінюється.

Вимірювання температури перегріву контактів при номінальному струмі контактів рівному 4 А показало, що температура перегріву не перевищувала у всіх випадках $29 \text{ }^\circ\text{C}$ і становила для матеріалу: Ср999 — $7 \text{ }^\circ\text{C}$, МДК — $13 \text{ }^\circ\text{C}$; СрКдИн–Ср999 — $29 \text{ }^\circ\text{C}$, МДК-3 — $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Досліджували контакти з ККМ МДК-3 після натурних випробувань в контакторі КНОА розробки і виробництва ВІЗ (Україна) і в силових кулачкових контакторах колекторів ЕКГ-8 електровозів.

Основні параметри серійного контактора КНОА: $I_n = 1250 \text{ А}$; $U_{ст} = 3000 \text{ В}$; $n = 60$ тисяч перемикань (при механічному ресурсі 1 млн. перемикань).

Технічні дані контролера ЕКГ-8: номінальна напруга між розімкненими контактами контактора з дугогасінням (V_n) становила 260 В; без дугогасіння — 100 В, номінальний струм кулачкових контакторів (I_n) — 1300 А.

Дія теплового потоку розряду й контактування з прослизанням призводять до руйнування початкової структури, формування в робочому шарі вторинної структури й сукупності нових шаруватих утворень з границями, що збагачені фазами на основі молібдену. Ця крихка шарувата структура відрізняється анізотропією шарів з великою віссю у напрямі прослизання контактів. В інших умовах

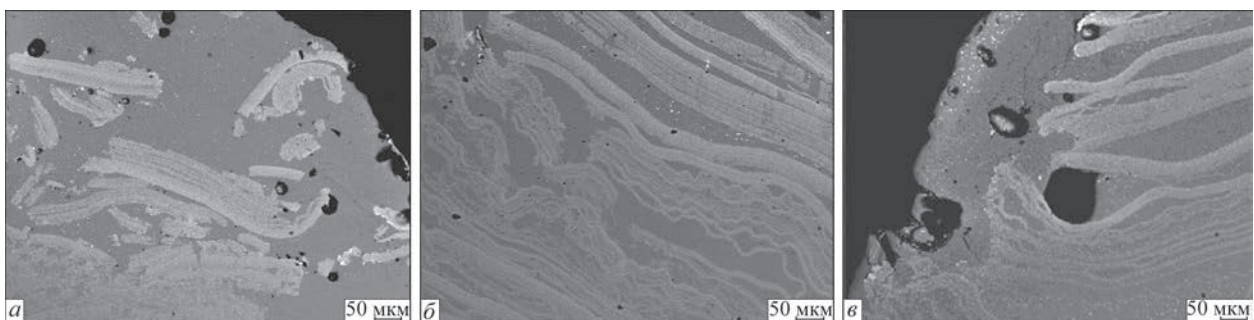


Рис. 7. Особливості руйнування шаруватої структури конденсату МДК-3 в робочому шарі контакту: а — розпад мікрошарів; б — деформація мікрошарів; в — утворення вторинної структури із мікрошарів

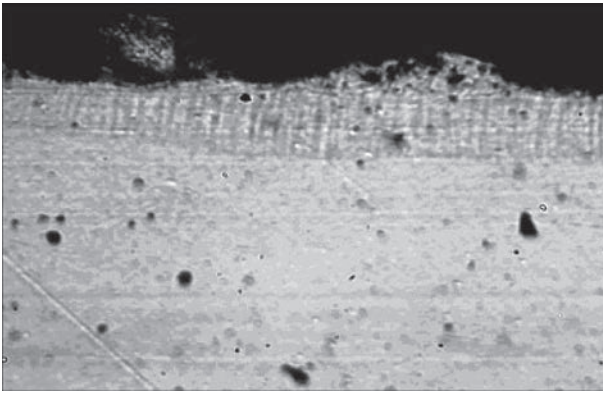


Рис. 8. Зона термічного впливу в робочому шарі одного з контактів контактної пари

контактування і теплової дії електричного розряду при збільшенні кількості циклів комутації струму відбувається повне руйнування шаруватої структури конденсату, яке супроводжується дробленням шарів, їх деформацією, консолідацією частинок у шарах, порушенням суцільності шарів вторинної структури в результаті пароутворення й вибухоподібного руйнування. Приклад такої структурної зміни в матеріалі конденсату в робочому шарі контакту наведений на рис. 7.

Слід зазначити різний характер структурних змін в робочому шарі контактів при комутації постійного струму: на поверхні одного — утворення кратера і шаруватого «сендвича» з порцій розплаву, іншого — практично рівномірний знос макрощару із зоною термічного впливу із стовпчастою структурою, обмеженою одним рівнем шару, що знаходиться нижче (рис. 8).

Таким чином, на основі аналізу особливостей зміни морфології структури можна припустити, що їх визначає полярність контактів і відмінність процесів, викликаних дією уніполярного розряду. Незначна, в межах одного макрощару до 100 мкм, зона термічного впливу розряду на робочий шар з ККМ Cu-Mo-Zr-Y свідчить про те, що цей матеріал може забезпечити необхідну електроерозійну стійкість контакту при комутації струму від 1 до 1000 А.

Виходячи із зазначеного і враховуючи особливості отримання ККМ по електронно-променевої технології, можна зробити висновок, що матеріали МДК [7, 8] мають ряд переваг: отримують за один технологічний цикл; дешевші в 1,5...1,7 рази за аналоги, які одержані методами порошкової металургії і суттєво дешевші (в 2,5...3,0 рази) за срібномісні контакти; експлуатаційною надійністю не поступаються матеріалам на основі срібловмісних композицій; добре піддаються обробці (різанню, штамповці, шліфуванню, сверлінню); легко паяються відомими методами пайки з використанням стандартних срібловмісних припоїв і припоями, які

не мають в своєму складі срібла. На сьогодні виготовляється більш як 376 типорозмірів контактів [9].

Висновки

1. Досліджені корозійна та ерозійна стійкість конденсованих із парової фази композиційних матеріалів Cu-Mo з концентрацією молібдену до 14 мас. %.
2. Показано, що композити з вмістом молібдену до 12 мас. % характеризуються достатньо високою корозійною стійкістю (бал стійкості — 2).
3. По ерозійній стійкості псевдосплави Cu-Mo не поступаються порошковим композитам срібло-оксид олова, срібло-оксид кадмію.
4. Електричні контакти, виготовлені із псевдосплавів Cu-Mo стабільно працюють в діапазоні струмів від 1 до 1000 А і напругах до 20000 В.

Список літератури

1. Гречанюк В.Г. (2013) *Фізико-хімічні основи формування конденсованих з парової фази композиційних матеріалів на основі міді*: Автореф. дис. ... д-ра хім. наук. Київ, 40.
2. Гречанюк Н.И., Минакова Р.В., Василега О.П. и др. (2010) Современное состояние и перспективы применения технологии высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения электрических контактов и электродов. *Труды ИПМ НАНУ. Электрические контакты и электроды*. Киев, 54–67.
3. Гречанюк Н.И., Гречанюк В.Г. (2018) Дисперсные и слоистые объёмные нанокристаллические материалы на основе меди и молибдена. Структура, свойства, технология, применение. Сообщение 1. Структура и фазовый состав. *Современная электрометаллургия*, 1, 42–53.
4. Гречанюк Н.И., Гречанюк В.Г. (2019) Механические свойства дисперсных и слоистых композиционных материалов на основе меди и молибдена. *Там же*, 2, 43–49.
5. (1980) *Унифицированные методики лабораторных испытаний эффективности ингибиторов коррозии в водных системах*. Рига, Институт неорганической химии АН Литовской ССР.
6. Гречанюк И.Н., Гречанюк В.Г., Емельянов Б.М., Руденко И.Ф. (1998) Коррозия композиционных материалов на основе меди, используемых для электрических контактов. *Труды ИПМ НАНУ. Электрические контакты и электроды*. Киев, 140–144.
7. *TU У 20113410.001–98*. Материали дисперсно-упрочненні для електричних контактів.
8. *TU У 24.4–53966101.2014*. Матеріали дисперсно-зміцнені для електричних контактів.
9. *TU У 31.2–20113410–003–2002*. Контакти електрические на основе дисперсно-упрочненных материалов (МДК).

References

1. Grechanyuk, V.G. (2013) *Physical-chemical principles of formation of copper-based composite materials condensed from vapor phase*: Syn. of Thesis for Dr. Chem. Sci. Degree. Kyiv, 40 [in Ukrainian].
2. Grechanyuk, N.I., Minakova, R.V., Vasilega, O.P. et al. (2010) State-of-the art and prospects of application of high-velocity electron beam evaporation technology and subsequent vacuum condensation of metals and nonmetals for producing of

- electric contact and electrodes. In: *Collect. of IPS NASU: Electric contacts and electrodes*. Kiev, 54–57 [in Russian].
3. Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G. (2018) Dispersed and laminar volumetric nanocrystal materials on base of copper and molybdenum. Structure, properties, technology, application. Information 1. Structure and phase composition. *Sovrem. Elektrometall.*, 1, 42–53 [in Russian].
 4. Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G. (2019) Mechanical properties of dispersed and laminar composite materials on copper and molybdenum base. *Ibid.*, 2, 43–49 [in Russian].
 5. (1980) *Unified procedures of laboratory testing of effectiveness of corrosion inhibitors in aqueous systems*. Riga, Inst. of Inorganic Chemistry [in Russian].
 6. Grechanyuk, I.N., Grechanyuk, V.G., Emelyanov, B.M., Rudenko, I.F. (1998) Corrosion of composite materials on copper base applied for electric contacts. In: *Collect. of IPS NASU: Electric contacts and electrodes*. Kiev, 140–144 [in Russian].
 7. *TU U 20113410.001–98*: Dispersion-strengthened materials for electric contacts [in Russian].
 8. *TU U 24.4-53966101.2014*: Dispersion-strengthened materials for electric contacts [in Ukrainian].
 9. *TU U 31.2-20113410-003–2002*: Electric contacts based on dispersion-strengthened materials (MDK) [in Russian].

CORROSION AND EROSION RESISTANCE OF COPPER AND MOLYBDENUM COMPOSITE MATERIALS CONDENSED FROM THE VAPOUR PHASE

I.M. Grechanyuk¹, V.G. Grechanyuk²

¹SPC «ELTECHMASH». 25 Vatutina Str., 21011, Vynnitsa, Ukraine. E-Mail: vin25ebt@ukr.net

²Kyiv National University of Construction and Architecture.

31 Povitroflsky Ave., 03037, Kyiv, Ukraine. E-Mail: knuba@knuba.edu.ua

The corrosion and erosion resistance of copper and molybdenum-based composite materials used as contact materials are considered in the paper. It is found that zirconium and yttrium (material MDK-3: Cu–(10...12 %) Mo–(0.2 %) Zr, Y) when introduced into the Cu–Mo system, increase the corrosion resistance by 20 % and the deep corrosion index decreases to 0.02 g/(m²·year). It is shown that the dependence of contact temperature change on the contact resistance is linear, the higher the contact resistance, the more intensively the contact temperature increases. The dependence of contact resistance of contacts made of materials MDK-3 and Ag–CdO on the number of switching cycles is established. The characteristics of contacts made of silver-containing materials and contact materials from MDK-3 were compared, and the advantages of the latter were shown. Ref. 9, Tabl. 1, Fig. 8.

Keywords: composite materials; corrosion resistance; contact resistance; contact materials, dispersion-strengthened materials

Надійшла до редакції 14.12.2019

ДОСЛІДНЕ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ БЮРО ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

У 1957 р. Рада Міністрів УРСР видала постанову, якою було передбачено організацію Дослідно-конструкторського бюро Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на засадах господарського розрахунку. Це сприяло реалізації ідеї Є.О. Патона про структуру Інституту за схемою «лабораторії — конструкторське бюро — дослідне виробництво». В тісному співробітництві учених і спеціалістів ІЕЗ, колектива ДЗЗУ, провідних підприємств України ДКТБ протягом 60 років створювало обладнання для різних механізованих способів зварювання та впроваджувало у виробництво завершені науково-дослідницькі розробки.

Колектив ДКТБ продовжує творчу працю зі створення нових технологій і зразків зварювального обладнання, якому знаходиться застосування практично в усіх галузях промисловості, металургії, будівництві, при підводних роботах і навіть в медицині.

Сьогодні пріоритетними напрямками діяльності сучасного ДКТБ є розробка обладнання та технології для автоматичного і механізованого дугового MIG/MAG зварювання з імпульсними алгоритмами роботи. У цьому напрямку розроблено обладнання з дозованою подачею наплавного порошкового дроту для наплавлення біметалевих листів на підприємстві Стіл Ворк. Спільно з компанією Geniwel (Південна Корея) проводяться роботи з розробки технології дозованої подачі зварювального дроту для зварювання нікелевих сталей з вмістом нікелю 9 % при виробництві танкерів і терміналів на замовлення компанії Hyundai. В рамках програми HORISON 2020 за проектом i-Weld в складі міжнародного консорціуму «Великобританія, Туреччина, Польща, Швеція, Малайзія, Україна», ДКТБ проводяться роботи з оптимізації керування технологічними процесами при дуговому автоматичному та напівавтоматичному зварюванні при спорудженні сталевих конструкцій в монолітному будівництві, в містобудуванні, енергетиці.

