

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТІВ ЗАЛЕЖНО ВІД СКЛАДОВИХ КОНТАКТНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ КОМУТАЦІЇ СТРУМУ

В. В. Коробський, кандидат технічних наук

Д. М. Зборицький, студент магістратури

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

Анотація. Досліджується величина проплавлення контактів пускачів типу ПМЛ зі струмових навантажень 4; 6,3; 10 А. При проведенні досліджень використовується контактний матеріал пускачів, що застосовується для виготовлення серійних контактів на основі срібла (СрН-90 та СрМ-0,2+М1) та дослідні контакти на основі міді. Наведено формулу для визначення величини (глибини) проплавлення при однократній комутації струму. Електрична дуга (час її горіння) безпосередньо пов'язані з електроерозійними явищами (глибиною проплавлення контакту). Формула для визначення глибини проплавлення отримана при розв'язку рівняння теплопровідності з урахуванням граничних умов II роду та пов'язує величину глибини проплавлення з енергетичними та теплофізичними параметрами контактного матеріалу, що обумовлюється складовими компонентами матеріалу.

Важкі умови експлуатації в сільському господарстві та численні фактори впливу утруднюють вибір контактного матеріалу для пускачів. Для забезпечення роботи апаратів із заданими показниками надійності їх контакт-деталі повинні протидіяти впливу електричної дуги, хімічно і біологічно агресивній атмосфері та механічним навантажень. У загальному вигляді контакти повинні характеризуватися такими фізичними параметрами: стабільністю контактного перехідного опору, високою питомою електропровідністю, високою ерозійною стійкістю та корозійною тривкістю, високою дугостійкістю і стійкістю до зварювання, поєднанням механічної міцності і високої пластичності.

Практично неможливо підібрати універсальний матеріал, який би відповідав усім названим вимогам, тому залежно від функціонального призначення контактного вузла приходиться приймати компромісне рішення. Контакти пускачів, які працюють в області малих та середніх струмів (і нечастого вмикання-вимикання струмів короткого замикання) повинні, перш за все, забезпечувати стабільність перехідного опору при впливі агресивних домішок атмосфери в поєднанні з високими дугостійкістю та стійкістю до зварювання. Тому за останні роки були зроблені спроби заміни контактного матеріалу Ag-Ni та Ag-CdO (застосовується в пусках ПМЛ від 25 А і вище) на інші матеріали.

Перехідний опір залежить від фактичної площі дотику контактів і від питомого опору контактного матеріалу. Ефективна площа контактування залежить від величини контактної натиску і з його ростом збільшується за

експоненціальною залежністю до того часу, поки напруга стискання не буде вищою межі текучості матеріалу. З іншої сторони, перехідний опір залежить від опору граничного шару, який визначається його складом (наявність оксидних, сульфідних та інших плівок, пилу тощо) і питомим електричним опором.

Враховуючи вимоги до комутуючих пристроїв пускачів, придатних для роботи в аграрному секторі та з метою економії благородних металів, розробки контактних матеріалів доцільно проводити в напрямку покращення властивостей багатокомпонентних композиційних матеріалів на основі міді і тугоплавких сполук.

Мідь є найбільш близьким матеріалом до срібла за фізико-механічними властивостями. Але її основний недолік полягає в тому, що в повітряній атмосфері вона окислюється і з зростанням температури процес окислення інтенсифікується. Внаслідок цього на поверхні міді з'являються ізоляційні плівки, які порушують роботу контактів, призводять до відмов.

Оксидні плівки міді, як відомо, утворюються і при кімнатній температурі і товщина їх досягає не більше 5 мкм. Така плівка захищає мідь від подальшого окислення киснем. Питомий опір Cu_2O - 10 мкОм·м, але він суттєво не впливає на контактний опір електродів, оскільки плівка дуже тонка, то електрони її проходять завдяки тунельному ефекту.

Ключові слова: величина проплавлення, контактний матеріал, електромагнітний пускач, контакт–деталь, електрична дуга, теплопровідність, температура, коефіцієнт температуропровідності, теплоємність

Актуальність. При комутації змінного струму електромагнітними пусками в контактному вузлі виділяється електромагнітна енергія W , при цьому може спостерігатися електрична дуга. Теплова енергія Q . при цьому витрачається на нагрівання маси матеріалу контактів і частково на плавлення металу на робочій поверхні (Q_1), а інша частина (Q_2) – на нагрівання маси уже розплавленого металу до температури кипіння і на випаровування частини металу. З іншої сторони, ця енергія W має дві складові: одну – прямопропорційну часу горіння дуги t_0 і яка обумовлюється активним навантаженням кола W_R , та другу – постійну W_L , яка дорівнює енергії магнітного поля, накопиченої в індуктивностях електричного кола і витрачається в комутуючих пристроях при комутації.

Якщо брати до уваги теплові і електромагнітні процеси для одного полюсу пускача, то отримаємо [1, 2]:

$$\begin{aligned} W = Q = Q_1 + Q_2 &= W_R + W_L = \\ &= P_{\text{сдп}} \cdot t_0 + W_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R + U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

де $P_{\text{ср}} = \frac{1}{6} U_0 I_0 \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0} \right)$ - середня потужність в контакт-деталях, яка визначається активною складовою навантаження R_0 , Вт; U_0 - напруга мережі (джерела живлення), В; I_0 - струм навантаження, А; U_1 - спад напруги на опорі контакту кола, В; ω_R - коефіцієнт, який показує відношення напруг U_1 і U_0 ; ω_L - коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола; ω - коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола і показує долю енергії магнітного поля W_L , яка витрачається власне в контакт-деталях при їх розмиканні [2].

Кількість тепла, необхідна для нагрівання контакт-деталі до температури плавлення Q_1 , діє на робочій поверхні [1, 2]. Тепло надходить перпендикулярно до поверхні і теплопровідність у всіх напрямках – однакова. Вважаємо, що тривалість потоків тепла Q_1 рівнозначна тривалості горіння електричної дуги між електродами t_0 ($\approx$ часу однократного замикання або розмикання контакт-деталей). Тому рівняння теплопровідності для нашого випадку (стаціонарний неоднорідний одновимірний процес) матиме такий вигляд [1]:

$$\frac{dT(x,t)}{dt} = a \cdot \frac{d^2T(x,t)}{dx^2}, \quad (t > 0; 0 < x < \infty) \quad (2)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ - коефіцієнт температуропровідності, м²/с; λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; c – питома теплоємність матеріалу контакт-деталі (ізохорна), Дж/кг·К; γ - густина контактного матеріалу, кг/м³; t – час надходження тепла до контакт-деталі, с.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використовуючи результати патентного пошуку в галузі контактних матеріалів для струмів до 10-25 А, наукові методи вибору компонентів композиційних матеріалів та службові функції ЕМП в електроустановок агропромислового сектору прототипом для створення дослідних КМ візьмемо відомі спечені контактні матеріали на основі міді КМК-Б00 (99,95%Cu), КМК-Б10 (97%Cu+3%C) і КМК-Б11 (95%Cu+5%C). Недолік цих матеріалів – низька електроерозійна стійкість, нестабільність контактного опору при роботі. Варто згадати, як прототипи, ще матеріали (48-72%)Cu+(0,5-5%)Ag+Mo(W)

та $\text{Cu}+(0,05-1,25\%)\text{Cr}+(0,05-1,0)\text{Zr}+(0,05-1,5)\text{Nb}$. Але, до вищезгаданих недоліків, додаються ще витрати дорогоцінного металу та завищений контактний опір.

Низька електроерозійна стійкість контактів КМК-Б10 і КМК-Б11 пояснюється здебільшого недосконалою мікроструктурою та ще невідповідним підбором складових міді та графіту.

Графіт володіє такими недоліками: низькою механічною міцністю і здатністю розшаровуватись внаслідок будови його кристалічної решітки. При нагріванні електричною дугою графіт, який має температуру сублімації 3700°C , нагрівається до високих температур і дає інтенсивний потік електронів термоемісії, що збільшує тривалість горіння дуги. Внаслідок цього мідь плавиться, випаровується, розбризкується, що призводить до значної електричної ерозії контактів.

У контактному матеріалі, який включає мідь, срібло і молібден (вольфрам) частинки молібдену піддаються атмосферній корозії і починають утворювати оксиди при температурі 600°C . Оксиди утворюють крихкотілий осад, внаслідок чого порушується контактна провідність. Утворення оксидів CuO , Cu_2O , їх термічний розклад під дією дуги і механічне розшаровування обумовлює підвищену витрату складової контактного матеріалу – міді.

Аналіз багатокомпонентного спеченого контактного матеріалу з додаванням хрому, ніобію, цирконію показав, що хром, ніобій і цирконій (у вказаному співвідношенні) не забезпечує йому необхідної електроерозійної стійкості і стабільності перехідного опору при температурі оточуючого середовища контактів $150\div 200^{\circ}\text{C}$.

Мета дослідження - встановлення взаємозв'язку між величиною проплавлення контактів та складовими контактного матеріалу при дії енергетичних факторів електричної дуги.

Матеріали і методи дослідження. Об'єкти експериментального дослідження - контакт-деталі електромагнітних пускачів ПМЛ-1100, що виготовлені з серійних матеріалів на основі срібла і дослідних контактних матеріалів на основі міді [5, 6, 7]. Марки та склад матеріалів контактів наведено в табл. 1.

Осцилограми напруги і струму, які отримані під час дослідження, зроблені з

використанням універсального двопробеневого запам'ятовуючого осцилографа С8-14. Вивчення мікрошліфів електродів здійснювалося з використанням мікроскопа МИМ-7. Параметри комутації (час горіння дуги і середнє значення струму в дузі) визначалося за осцилограмами. Похибка вимірюваних величин не перевищує 5 %. Математичні розрахунки проводяться з використанням програми «MathCAD 7 Professional».

Результати досліджень та їх аналіз. Важкі умови експлуатації в сільському господарстві та численні фактори впливу утруднюють вибір контактного матеріалу для пускачів. Для забезпечення роботи апаратів із заданими показниками надійності, їх контакт-деталі повинні протидіяти впливу електричної дуги, хімічно і біологічно агресивній атмосфері та механічним навантаженням. У загальному вигляді контакти повинні характеризуватися такими фізичними параметрами: стабільністю контактного перехідного опору, високою питомою електропровідністю, високою ерозійною стійкістю та корозійною тривкістю, високою дугостійкістю і стійкістю до зварювання, поєднанням механічної міцності і високої пластичності.

Практично неможливо підібрати універсальний матеріал, який би відповідав усім названим вимогам, тому залежно від функціонального призначення контактної вузла приходить приймати компромісне рішення. Контакти пускачів, які працюють в області малих та середніх струмів, (і нечастого вмикання-вимикання струмів короткого замикання) повинні, перш за все, забезпечувати стабільність перехідного опору при впливі агресивних домішок атмосфери в поєднанні з високими дугостійкістю та стійкістю до зварювання. Тому за останні роки були зроблені спроби заміни контактної матеріалу Ag-Ni та Ag-CdO (застосовується в пускачах ПМЛ від 25 А і вище) на інші матеріали.

Враховуючи вимоги до комутуючих пристроїв пускачів, придатних для роботи в аграрному секторі та з метою економії благородних металів, розробки контактних матеріалів доцільно проводити в напрямку покращення властивостей багатокомпонентних композиційних матеріалів на основі міді і тугоплавких сполук.

Мідь є найбільш близьким матеріалом до срібла за фізико-механічними властивостями. Але її основний недолік полягає в тому, що в повітряній атмосфері

вона окислюється і з зростанням температури процес окислення інтенсифікується. Внаслідок цього на поверхні міді з'являються ізоляційні плівки, які порушують роботу контактів, призводять до відмов.

Оксидні плівки міді, як відомо, утворюються і при кімнатній температурі і товщина їх досягає не більше 5 мкм. Така плівка захищає мідь від подальшого окислення киснем. Питомий опір Cu_2O - 10 мкОм·м, але він суттєво не впливає на контактний опір електродів, оскільки плівка дуже тонка, то електрони її проходять завдяки тунельному ефекту.

Для підвищення електроерозійної стійкості і збереження стабільного контактного опору нами були введені домішки, які дозволили створити і запатентувати нові композиційні матеріали:

1. $\text{Cu}+(10-15\%)\text{Mo}+(2-3\%)\text{MoO}_3+(1-3\%)\text{C}+(0,8-1,0\%)\text{Ni}$ [3]. Обґрунтуємо введення складових компонентів для КМ. Введення молібдену, який не взаємодіє з міддю ні в твердому, ні в рідкому стані, значно підвищує твердість, міцність та дугостійкість. Для стабілізації контактного опору були введені легуючі домішки триоксиду молібдену MoO_3 і графіту С. Одночасне введення Мо, MoO_3 , Ni, С надають матеріалу необхідні службові властивості, які необхідні для матеріалів ЕМП. Механізм формування композиції із Мо та Cu визначається процесами, які проходять на поверхнях розподілу фаз, а саме, змочуванням та адгезією. Відсутність взаємодії між компонентами композиції Мо-Cu і неповне розтікання міді на поверхні молібдену утруднює отримання безпористих матеріалів. Для кращої взаємодії на межі розділу Cu-Мо в композицію вводиться нікель в межах (0,8-1,0) ваг.%. Молібден, як тугоплавка складова композиції, визначає механічну міцність матеріалу.

Легування нікелем помітно впливає на механізм руйнування контактів, що визначає їх електроерозійну стійкість. Із введенням в композицію нікелю зростає розчинність молібдену в рідкій фазі і змінюється структура робочої зони контакту. При розряді в повітрі температура каналу дуги досягає декількох десятків тисяч градусів, пари металів в об'ємі каналу розряду створюють досить великий тиск, в композиції збільшується кількість рідкої фази, яка розділяє шар молібдену, який

спікся, від основної структури композиції. У процесі горіння дуги струм на поверхні контакту локалізується на відносно малих ділянках, які обмежені розмірами плям дуги на контактах. Внаслідок цього виникають термічні перенапруги, які викликають розтріскування шару молібдену. Чим вище модуль пружності і більша різниця коефіцієнтів теплового розширення, тим більша роль крихкого руйнування в ефекті ерозії. Нікель підвищує корозійну тривкість матеріалу.

При горінні електричної дуги графіт нагрівається до температури 3700 °С і вище, сублімує і переходить у відновлювальний газ CO, CO₂, який з дугового каналу і простору навколо нього забирає кисень, що в кінцевому результаті запобігає окисленню робочої поверхні контактів і скорочує час горіння дуги. Внаслідок цього стабілізується контактний опір і зменшується ерозія за рахунок утворення карбідів молібдену MoC₃. Крім цього, графіт знижує імовірність і силу зварювання контактів. Уведення триоксиду молібдену MoO₃ збільшує швидкість переміщення дуги на поверхні і видуває її з поверхні. Це відбувається внаслідок сублімації триоксиду молібдену MoO₃ при температурі 650 °С, який значно збільшується в об'ємі в газовій формі. У такому вигляді молекули MoO₃ при температурі 900-1000 °С полімеризуються в більш складні сполуки, що забирає частину енергії дуги. Потенціал іонізації MoO₃ значно вищий, ніж в атомів Cu і Mo, що деіонізує дугу і скорочує час її горіння. Все це призводить до зменшення окислення робочої поверхні контактів і збереження стабільного контактного опору. Експериментальна перевірка матеріалу дала такі результати по початковому значенню контактного опору $R_k=4,0-4,1$ мОм, а коефіцієнт електричної ерозії складає $k=-(8,1-10,1) \cdot 10^{-8}$ г/цикл, питомий електричний опір $\rho=0,04-0,043$ мкОм·м.

2. Cu+(12-15%)Nb+(0,8-1,0%)Zr+(0,3-0,5%)Y₂O₃ [4] При комутації електричного струму в агресивному середовищі на робочих поверхнях контактів утворюються дискретні струмопровідні плівки складних оксидів цирконію, ітрію, ніобію, міді, які важко сублімують і зменшують контактний опір, підвищуючи корозійну тривкість. Введення ніобію в композицію дозволяє створити гетерогенну структуру більш дисперсну, а також підвищити механічну міцність матеріалу за рахунок створення твердих розчинів Cu і Nb. При температурі 1100 °С розчинність ніобію в міді складає

1,66 ат%, а міді в ніобію - 2 ат%. Також ніобій і його тверді розчини значно підвищують жароміцність і жаростійкість матеріалів.

Цирконій (у кількості 0,8-1,0 %) зміцнює матеріал за рахунок створення твердих розчинів з міддю: $ZrCu_3$, $ZrCu_4$, $ZrCu_5$, температура плавлення цих розчинів складає $1100 \div 1500$ °С. Контактний опір становить $R_k = 5,20 \div 5,48$ мОм, коефіцієнт електричної ерозії складає $k = -(2,18 \div 2,5) \cdot 10^{-8}$ г/цикл, питомий електричний опір - $\rho = 0,038 - 0,04$ мкОм·м.

3. $Cu + (5,0 - 10\%)Cr + (1,0 - 3,0\%)TiB_2 + (2,0 - 3,0\%)Nb + (1,0 - 2,0\%)C + (0,5 - 0,7\%)Zr$ [5].

Домішка хрому дозволила дисперсно зміцнити матеріал за рахунок високої твердості Cr, яка перевищує твердість міді майже в три рази. Хром під дією дуги, яка виникає при комутації струму, легко окисляється до Cr_2O_3 , що підвищує опір дуги. Внаслідок цього струм у дузі зменшується, час горіння дуги скорочується, що веде до зменшення ерозії. Мідь менше окислюється за рахунок поглинання хромом кисню, що стабілізує контактний опір. Частинки ніобію на робочій поверхні контактів створюють великий градієнт температури на межі фаз Nb–Cu, тому що температура плавлення ніобію складає 2470 °С, а міді – 1083 °С (тобто градієнт температури складає 1387 °С). Внаслідок цього зерна міді на межі з ніобієм плавляться, випаровуються і розбризкуються, що призводить до підвищення стійкості проти зварювання, але і до нерівномірного і завищеного зносу. Це не дуже корисне явище вдається трохи усунути спільним введенням до міді дибориду титану TiB_2 і графіту C та збільшенням процентного складу інших компонентів, що надає КМ нових властивостей. Диборид титану є розкислювачем, тому що мідь утворює структурні вільні оксиди, які виникають при термічних операціях. Він починає окислюватись при температурі 1500 °С, забираючи кисень і знижуючи час горіння дуги. Під впливом дуги утворюється борид цирконію, температура плавлення якого складає 3040 °С. Диборид титану TiB_2 має твердість $H_v = 3400$ кгс/мм², питомий опір $\rho = 0,284$ мкОм·м, температуру плавлення – 2920 °С. Тому, додаючи його до складу, ми зміцнюємо композицію, підвищуючи фізико-механічні властивості і електроерозійну стійкість. Графіт вступає у взаємодію зі складовими матеріалу (Cr,

Zr, Nb) і утворює такі карбіди: Cr_3C_2 , (твердість $H_v=1330 \text{ кгс/мм}^2$), ZrC ($H_v=2600 \text{ кгс/мм}^2$), NbC ($H_v=2400 \text{ кгс/мм}^2$). Твердість карбідів значно перевищує твердість міді і простих сплавів, тому значно зростає твердість поверхневих робочих шарів контакту.

Основні складові композиційного КМ і деякі шари наробітку мають дуже різні температури плавлення: $\text{Cu} - 1083^\circ\text{C}$, $\text{Cr} - 1900^\circ\text{C}$, $\text{Zr} - 1895^\circ\text{C}$, $\text{Nb} - 2470^\circ\text{C}$, $\text{TiB}_2 - 2920^\circ\text{C}$, $\text{ZrB} - 3040^\circ\text{C}$, а температура сублімації графіту – 3700°C . Такий різний спектр температур призводить до зменшення на поверхні контактів температурного градієнту, що запобігає розтріскуванню металу та бурхливому випаровуванню і розбризкуванню. Наявність фазової неоднорідності на робочій поверхні контактів викликає появу горизонтальних потоків тепла в зоні, що прилягає до поверхні дотику контактів. Це призводить до зменшення енергії, яка потрапляє в контакт, тим самим зменшуючи глибину проплавлення та коефіцієнт інтенсивності електричної ерозії.

Композиційний матеріал має гетерогенну мікроструктуру. Невелика взаємна розчинність компонентів при дії електричної дуги зі зниженням температури $(4,0-8,0) \cdot 10^3^\circ\text{C}$ зменшується і відбувається виділення частинок Cu , Nb , Cr , Zr , Ti з їх взаємних розчинів, що суттєво подрібнює зерна і зміцнює матеріал. Подрібнення зерен сприяє зниженню температури рекристалізації, що підвищує температурну міцність і призводить до зниження електричної ерозії. Контактний опір і ерозійна стійкість складають: $R_k=4,30-4,80 \text{ мОм}$, $k= \pm(6,05-8,25) \cdot 10^{-8} \text{ г/цикл}$, а питомий електричний опір - $\rho=0,035-0,038 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Оскільки спечені матеріали в більшості випадків є механічною сумішшю компонентів, то їх загальна електропровідність повинна дорівнювати сумі електропровідностей компонентів. Але, в дійсності, значення питомого електричного опору КМ, в значній мірі, відрізняється від розрахункових значень. Це пов'язано з тим, що спечений матеріал у загальному випадку складається не тільки з чисто механічної суміші компонентів, але також із твердих розчинів, багатофазних систем і хімічних сполук. З іншої сторони, помітний вплив на електропровідність матеріалу здійснюють механічні параметри матеріалу (пористість, твердість, мікроструктура,

розмір частин тощо), які головним чином, визначаються технологією виготовлення матеріалу [6].

Найбільший вплив на електропровідність матеріалу (в сторону зменшення) має графіт. Можна пояснити це тим, що питомий опір графіту на декілька порядків вище питомого опору міді (приблизно в 500-1000 разів) і, крім того, питома вага його в $6 \div 8$ разів менша.

Відносно незначний вплив на питомий опір здійснюють домішки ніобію, хрому, які мають приблизно однакову з міддю питому вагу, хоча і провідність приблизно на порядок нижчу. Дещо більший вплив на питомий електричний опір мають неметалічні добавки (Y_2O_3 , TiB_2). Однак їх вміст в матеріалах, як правило, не перевищує 3 ваг.%, що не має визначального впливу на збільшення питомого опору.

Визначення величини глибини проплавлення h при однократній комутації зводиться до розв'язку рівняння (2), при цьому використаємо формулу (1). Після проведених математичних перетворень величина глибини проплавлення визначається [7]:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\psi b T_{розр}}}, \quad (3)$$

де t_0 - час горіння електричної дуги, який визначається за осцилограмами.

$\psi = 8,727$ – коефіцієнт пропорційності, який враховує співвідношення між розмірами контакт-деталі.

$b = \sqrt{\pi \lambda \gamma c}$ - коефіцієнт, який визначається тільки теплофізичними характеристиками контактного матеріалу (табл. 1).

1. Теплофізичні характеристики і розрахункові температури для контактних матеріалів

Контактний матеріал	Теплофізичні характеристики і розрахункові температури									
	λ , Вт/м К	γ , $\times 10^3$ кг/м ³	a_1 , $\times 10^{-4}$ м ² /с	$\frac{c}{c_1}$, Дж кг·К	$T_{пл}$, °С	$T_{кип}$, °С	$\frac{q_1}{q_2} \cdot 10^3$, Дж кг	$\frac{Дж \cdot c^{-1/2}}{м^2 \cdot К}$	$T_{1роз}$, °С	$T_{2роз}$, °С
1. СpН-90	384	10,1	1,475	$\frac{257,5}{317,8}$	1010	2262	$\frac{109,8}{2836}$	56013	1436	1118 7
2. СpМ-0,2+М1	350	10,49	1,417	$\frac{235}{290,5}$	961	2181	$\frac{93}{2357,9}$	52105	1357	1029 8
3. 83%Cu+10%Mo+3%MoO ₃ +3%C+1,0%Ni	369,4	8,74	1,11	$\frac{380,8}{470}$	1310	2520	$\frac{214,4}{7429}$	62151	1873	1832 7
4. 86,5%Cu+12%Nb+1,0%Zr+0,5%Y ₂ O ₃	359,5	8,86	1,083	$\frac{374,5}{462,2}$	1263	3223	$\frac{223,4}{5675,4}$	61216	1860	1550 3
5. 81,3%Cu+10%Cr+3,0%TiB ₂ +3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr	361	8,47	1,075	$\frac{396,5}{489,2}$	1319	2501	$\frac{229}{6896,9}$	61703	1897	1659 9

$T_{i розр}$ - температура зон плавлення, кипіння (випаровування), яка досягається до кінця часу горіння дуги t_0 ; λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; γ - густина контактного матеріалу, кг/м³; c_1 – питома теплоємність розплавленого металу, Дж/кг·К; c – питома теплоємність нерозплавленого (холодного) металу, Дж/кг·К;

Величина глибини проплавлення за даними випробуваних зразків контактних матеріалів становить: $h \approx (0,01 \dots 0,1) \text{ мм} = (1,0 \dots 10) \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (табл. 2).

Отже, деякі теплофізичні характеристики та розрахункові температури плавлення та кипіння для серійних і екологічно безпечних дослідних контактних матеріалів, а також числові значення глибини проплавлення для матеріалів при різних величинах струму, наведено в табл. 1 та табл. 2, за даними яких побудовано графіки залежності значення глибини проплавлення від часу горіння дуги (рис. 1,

рис. 2).

2. Результати розрахунків глибини зон плавлення h_1 і кипіння h_2 контакт-деталей в пусках ПМЛ.

Контактний матеріал	Глибини зон h_1 і h_2 , м						
	Температура	Струм, А	Час горіння дуги, мс				
			$t_0=10$	$t_0=20$	$t_0=30$	$t_0=40$	$t_0=50$
1. СрН-90	$T_{1розр}$	I=4	5.457e-5	5.588e-5	5.836e-5	6.084e-5	6.314e-5
		I=6,3	6.849e-5	7.013e-5	7.324e-5	7.635e-5	7.924e-5
		I=10	8.629e-5	8.836e-5	9.228e-5	9.619e-5	9.984e-5
	$T_{2розр}$	I=4	1.955e-5	2.002e-5	2.091e-5	2.18e-5	2.262e-5
		I=6,3	2.454e-5	2.513e-5	2.624e-5	2.735e-5	2.839e-5
		I=10	3.092e-5	3.166e-5	3.306e-5	3.446e-5	3.577e-5
2. СрМ-0,2+М1	$T_{1розр}$	I=4	5.821e-5	5.96e-5	6.225e-5	6.489e-5	6.735e-5
		I=6,3	7.305e-5	7.48e-5	7.812e-5	8.143e-5	8.452e-5
		I=10	9.207e-5	9.428e-5	9.846e-5	1.026e-4	1.065e-4
	$T_{2розр}$	I=4	2.113e-5	2.164e-5	2.26e-5	2.355e-5	2.445e-5
		I=6,3	2.652e-5	2.715e-5	2.836e-5	2.956e-5	3.068e-5
		I=10	3.341e-5	3.421e-5	3.573e-5	3.724e-5	3.866e-5
3. 83%Cu+10%Mo+3%MoO ₃ +3%C+1,0%Ni	$T_{1розр}$	I=4	4.538e-5	4.647e-5	4.853e-5	5.059e-5	5.250e-5
		I=6,3	5.695e-5	5.832e-5	6.090e-5	6.349e-5	6.589e-5
		I=10	7.175e-5	7.347e-5	7.673e-5	7.998e-5	8.302e-5
	$T_{2розр}$	I=4	1.451e-5	1.486e-5	1.552e-5	1.617e-5	1.679e-5
		I=6,3	1.821e-5	1.864e-5	1.947e-5	2.030e-5	2.107e-5
		I=10	2.294e-5	2.349e-5	2.453e-5	2.557e-5	2.654e-5
4. 86,5%Cu+12%Nb + 1,0%Zr+0,5%Y ₂ O ₃	$T_{1р}$	I=4	4.588e-5	4.698e-5	4.907e-5	5.115e-5	5.309e-5
		I=6,3	5.758e-5	5.896e-5	6.158e-5	6.419e-5	6.662e-5
		I=10	7.254e-5	7.429e-5	7.758e-5	8.087e-5	8.394e-5
	$T_{2р}$	I=4	1.589e-5	1.628e-5	1.700e-5	1.772e-5	1.839e-5
		I=6,3	1.995e-5	2.043e-5	2.133e-5	2.224e-5	2.308e-5
		I=10	2.513e-5	2.573e-5	2.688e-5	2.801e-5	2.908e-5
5. 81,3%Cu+10%Cr + 3,0%TiB ₂ +3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr	$T_{1р}$	I=4	4.526e-5	4.635e-5	4.840e-5	5.045e-5	5.237e-5
		I=6,3	5.680e-5	5.816e-5	6.074e-5	6.332e-5	6.572e-5
		I=10	7.156e-5	7.328e-5	7.653e-5	7.978e-5	8.280e-5
	$T_{2р}$	I=4	1.530e-5	1.567e-5	1.636e-5	1.706e-5	1.770e-5
		I=6,3	1.920e-5	1.966e-5	2.053e-5	2.141e-5	2.222e-5
		I=10	2.419e-5	2.477e-5	2.587e-5	2.697e-5	2.799e-5

Час горіння електричної дуги t_0 в низьковольтних електромагнітних пусках змінного струму становить не більше одного напівперіоду синусоїди (рис. 3), а час розмикання контакт-деталей знаходиться в межах $t=0,02 \text{ с}=20 \text{ мс}$. За технічними даними конструкційних документів пускачів, повний час вмикання пускачів ПМЛ-1100 складає приблизно $t_{1повн}=17 \text{ мс}$, а ПМЛ-2100 - $t_{2повн}=22 \text{ мс}$.

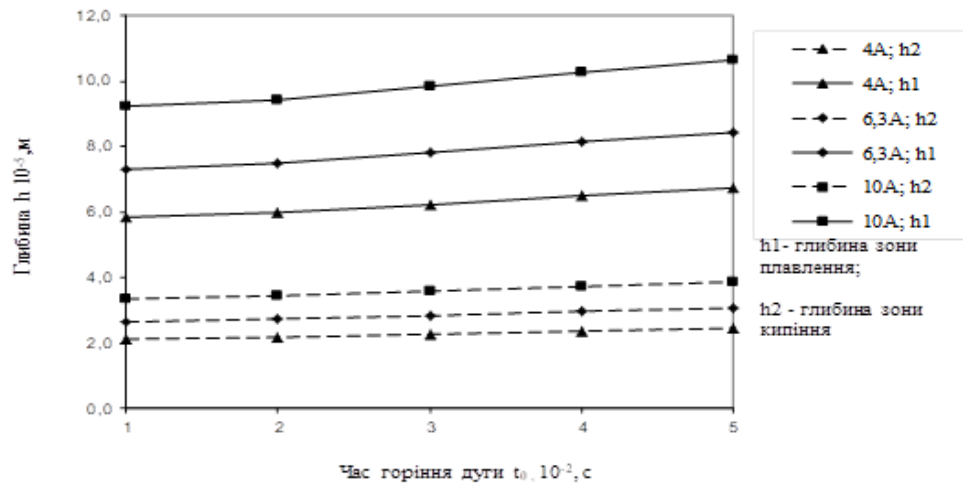


Рис.1. Значення глибини проплавлення контакт-деталі пускача при різних величинах струму. Матеріал СрМ-0,2+М1.

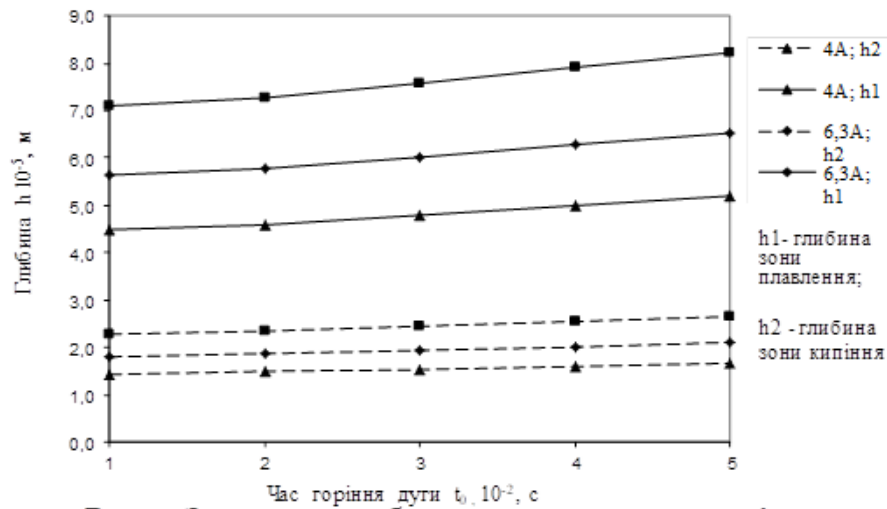


Рис. 2. Значення глибини проплавлення при різних величинах струму. Матеріал 78%Cu+15%Mo+3%MoO₃+3%C+1,0%Ni.

Основні теплофізичні характеристики і розрахункові температури плавлення та кипіння для дослідних контактних матеріалів обумовлюються складовими, що входять до складу матеріалу (див. вище).

Осцилограми електричної дуги в електромагнітних пускачах ПМЛ 1100 наведені на рис. 4, а та 4,б. Як видно з осцилограм час горіння дуги на контактах з дослідного матеріалу менше, ніж для матеріалів серійних контактів.

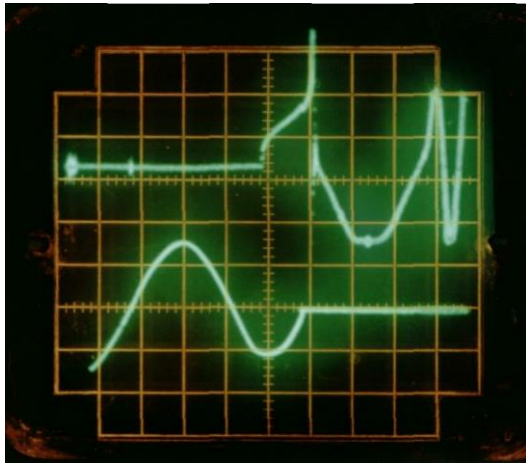
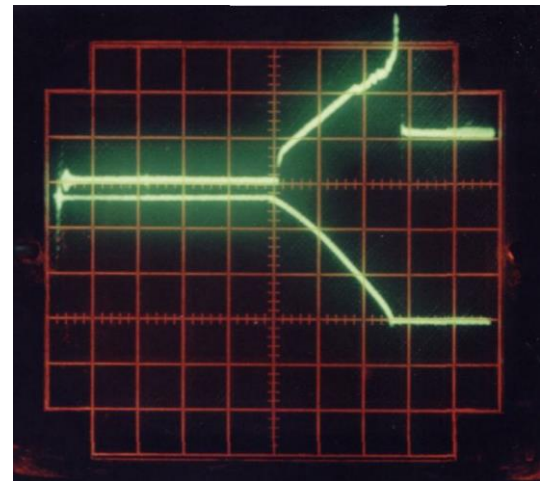
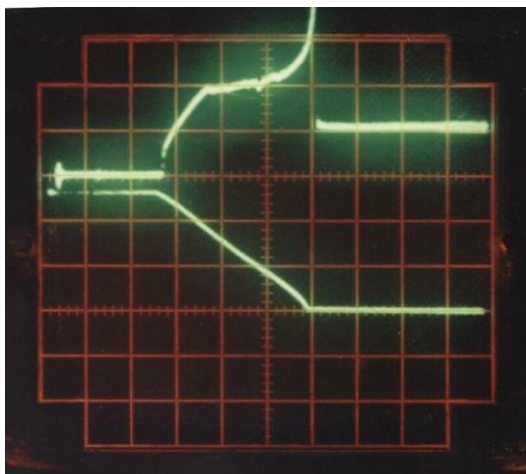


Рис. 3. Осцилограма розмикання електромагнітного пускача ПМЛ-1100 (змінний струм)

Параметри кола: $U=65$ В, $I=10$ А, $\cos\varphi=0,65$; ($R=4,2$ Ом, $L=15,6$ мГн).



Розмикання: $U=65$ В; $I=10$ А; $\tau=40$ мс; $L=240$ мГн; ($m=10$ мс/пол.: $m_v=50$ В/пол.: $m_i=0,05$ В/пол.)

а - матеріал $\text{CpMo}_{0,2}+\text{M1}$

б - матеріал $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+2,0\%\text{TiB}_2+3,0\%\text{Nb}+2,0\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$

Рис. 4. Осцилограми електричної дуги в електромагнітних пусках ПМЛ 1100 для різних контактних матеріалів (постійний струм).

При вивченні шліфу повздовжнього перерізу електродів із матеріалу $83\%\text{Cu}+10\%\text{Mo}+3\%\text{MoO}_3+3\%\text{C}+1,0\%\text{Ni}$ під мікроскопом МИМ-7 було встановлено, що максимальна глибина проплавлення КМ від поверхні електроду становить $0,08$ мм при параметрах $I_{\text{ном}}=10$ А, $\tau=40$ мс, $t_0=26$ мс (рис. 4, б). Різниця розрахункових ($h_1=7,673 \cdot 10^{-5}$ м при $t_0=30$ мс) і експериментальних даних становить $4,1$ %. Таким чином, враховуючи, що розрахунок теплового режиму контактів зроблено один раз, співпадання результатів розрахунку з експериментальними даними задовільне.

Висновки і перспективи.

1. Величина проплавлення контактів h є функцією енергетичних, теплофізичних характеристик контактного матеріалу, розрахункової температури розплавлення, кипіння, випаровування контактного матеріалу.

2. Глибина проплавлення контактів залежить, в першу чергу, від значення комутованого струму (4; 6,3; 10 А) та часу горіння дуги.

3. Розрахунок величини h здійснений для контактного матеріалу, який має гетерогенну структуру. Тому для контактів гомогенної структури картина може змінюватися і в розрахунках потрібно враховувати фактор гетерогенності. Результати розрахунку тепловиділення в процесі комутації електричного струму, теплового режиму та глибини проплавлення контактів пускачів досить гарно співпадають з експериментальними даними глибини проплавлення (за дослідженням шліфів повздовжнього перерізу електродів відрізняються на 4...5 %).

4. Створено екологічно безпечні контактні матеріали на основі міді для апаратів, що працюють в електроустановках сільського господарства, при невисокій вартості із заданим рівнем надійності щодо перехідного опору.

5. Загалом, питомий опір композиційних матеріалів на основі міді має значення, співставне з величиною питомого опору матеріалів на основі срібла (КМК-А10м, КМК-А40), але в контактів СрН-90, СрМ-0,2+М1 величина питомого опору дещо нижча.

Список використаних джерел

1. Карташов Э. М., Кудинов В. А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М.: Либроком, 2018. 656 с.

2. Томан А. С., Сагач М. Ф., Кохановский С. П. Электроэнергетические показатели разрывных контактов. Электрификация сельскохозяйственного производства. Научные труды УСХА. К.: Издательство УСХА. 1975. Вып. 110, том II. С. 61–71.

3. Пат. 1792445 АЗ СРСР, МКИ⁵ С 22 С 9/00, Н 01 Н 1/02. Спечений матеріал для електричних контактів на основі міді / Братерська Г.М., Коханівський С.П., Донцова Т.О., Наливайко В.А., Коробський В.В., Мрачківський А.М. (СРСР); заявник УСГА. – №5009871/02; заявл. 03.07.1991; опубл. 30.01.1993, Бюл. №4, 1993 р.

4. Пат. 1790821 СРСР, МКИ⁵ 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.

5. А.с. №1677723 СРСР, МКІ⁵ Н 01 Н 1/02, С 22 С9/00. Спечений матеріал на основі міді для електричних контактів /Донцова Т.О., Братерська Г.М., Коханівський С.П., Наливайко В.А., Коробський В.В., Григорьев А.А. (СРСР); заявник УСГА. – №4755177/02; заявл. 01.11.1989; опубл.15.09.1991, Бюл. №34. – 2 с.

6. 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: 2018. 11 th International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11) Molecular Crystals and Liquid Crystals. Ivano–Frankivsk (Ukraine), May 21-25, 2018. P. 35.

7. Коробський В. В., Туцький В. Г. Глибина проплавлення контактів як функція енергетичних та теплофізичних параметрів контактного матеріалу. Енергетика і автоматика. 2018. №6 (36). С. 140 – 153.

References

1. Kartashov, E. M., Kudinov, V. A. (2018). Analiticheskaya teoriya teploprovodnosti i prikladnoy termouprugosti [Analytical theory of heat conduction and applied thermoelasticity]. Moscow: Librokom, 656. [in Russian].

2. Toman, A. S., Sagach, M. F., Kohanovskiy, S. P. (1975). Elektroenergeticheskie pokazateli razryivnyih kontaktov [Electricity indicators of breaking contacts]. Electrification of agricultural production. Scientific Works of USHA. Kiev: Publisher USHA, 110/II, 61-71. [in Russian].

3. Braterskaya, G. M., Kochanovsky, S. P., Dontsova, T. O., Nalyvayko, V. A., Korobskiy, V. V., Mravchovskiy, A. M. Spechenyi material dlia elektrychnykh kontaktiv na osnovi midi. [Sintered material for electrical contacts on the basis of copper]. Patent of the USSR, no. 1792445 A3, МКІ5 С 22 С9 / 00, Н 01 N 1/02. The applicant of the USHA. – No. 5009871/02; stated. July 3, 1991; has published Jan 30, 1993, Bul. No. 4, 1993. [in Ukrainian].

4. 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. [in Ukrainian].

5. Dontsova, T. O., Braterskaya, G. M., Kochanovskiy, S. P., Nalyvayko, V. A., Korobskiy, V. V., Grygorev, A. A. Spechenyi material na osnovi midi dlia elektrychnykh kontaktiv [Sintered copper-based material for electrical contacts]. A.s. of the USSR, no. 167723, МКІ5 N 01 N 1/02, S 22 S9/00. The applicant of the USHA. – No. 4755177/02; stated. November 1, 1989; has published September 15, 1991, Bul. No. 34, 1991. [in Ukrainian].

6. 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: 11 th International Conference "Electronic Processes in Organic and

Inorganic Materials" (ICEPOM-11). Molecular Crystals and Liquid Crystals. Ivano-Frankivsk (Ukraine), 35. [in English].

7. Korobskiy, V. V., Tutskiy V. G. (2018). Hlybyna proplavlennia kontaktiv yak funktsiia enerhetychnykh ta teplofizychnykh parametriv kontaktного materialu [Contact penetration depth as a function of energy and thermophysical parameters of the contact material]. Enerhetyka i avtomatyka – Energy and automation, 6 (36), 140 – 153. [in Ukrainian].

RESEARCH OF THE VALUE OF CONTACT MELTING DEPENDING ON THE COMPONENTS OF THE CONTACT MATERIAL DURING CURRENT SWITCHING

V. Korobskiy, D. Zborshchuk

Adstract. *The amount of melting of PML-type starter contacts with current load 4 is investigated; 6.3; 10A. The contact material of the starters used for the production of silver-based serial contacts (CpH-90 and CpM-0.2+M1) and experimental copper-based contacts is used in the research. The formula for determining the amount (depth) of penetration during a single current switching is given. The electric arc (its burning time) is directly related to electroerosion phenomena (depth of contact penetration). The formula for determining the depth of penetration is obtained by solving the equation of thermal conductivity taking into account the boundary conditions of the II kind and relates the value of the depth of penetration to the energy and thermophysical parameters of the contact material, which is determined by the constituent components of the material.*

Difficult operating conditions in agriculture and numerous influencing factors complicate the choice of contact material for starters. In order to ensure the operation of devices with specified reliability indicators, their contact details must resist the influence of an electric arc, a chemically and biologically aggressive atmosphere, and mechanical loads. In general, contacts should be characterized by the following physical parameters: stability of contact transient resistance, high specific electrical conductivity, high erosion resistance and corrosion resistance, high arc resistance and resistance to welding, a combination of mechanical strength and high plasticity.

It is practically impossible to choose a universal material that would meet all the mentioned requirements, therefore, depending on the functional purpose of the contact node, a compromise decision has to be made. Contacts of starters operating in the area of small and medium currents (and infrequent switching on and off of short-circuit currents) must, first of all, ensure the stability of the transient resistance under the influence of aggressive atmospheric impurities in combination with high arc resistance and resistance to welding. Therefore, in recent years, attempts have been made to replace the contact material Ag-Ni and Ag-CdO (used in PML starters from 25 A and above) with other materials.

Transient resistance depends on the actual contact area of the contacts and on the specific resistance of the contact material. The effective area of contact depends on the magnitude of the contact pressure and increases exponentially with its growth until the compressive stress is higher than the yield point of the material. On the other hand, the transient resistance depends on the resistance of the boundary layer, which is determined

by its composition (the presence of oxide, sulfide and other films, dust, etc.) and specific electrical resistance.

Taking into account the requirements for switching devices of starters suitable for work in the agricultural sector and in order to save precious metals, it is appropriate to develop contact materials in the direction of improving the properties of multi-component composite materials based on copper and refractory compounds.

Copper is the closest material to silver in terms of physical and mechanical properties. But its main drawback is that it oxidizes in the air and the oxidation process intensifies as the temperature rises. As a result, insulating films appear on the surface of the copper, which disrupt the operation of the contacts and lead to failures.

It is known that copper oxide films are formed even at room temperature and their thickness reaches no more than 5 μm . Such a film protects copper from further oxidation by oxygen. The specific resistance of Cu_2O is 10 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, but it does not significantly affect the contact resistance of the electrodes, since the film is very thin, so electrons pass through it due to the tunnel effect.

Key words: amount of penetration, contact material, electromagnetic starter, contact-part, electric arc, thermal conductivity, temperature, coefficient of thermal conductivity, heat capacity