

УДК 621.3.066.5/6:636

ГЛИБИНА ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТІВ ЯК ФУНКЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНТАКТНОГО МАТЕРІАЛУ

В. В. Коробський, кандидат технічних наук, доцент

В. Г. Туцький, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

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

Анотація. Досліджено контакти пускачів типу ПМЛ зі струмових навантаженням 4; 6,3; 10А. При дослідженнях використовувалися контакт-деталі пускачів, що виготовлені із серійних контактів на основі срібла та екологічно безпечні дослідні контакти на основі міді. Наведено формулу для визначення величини глибини проплавлення при однократній комутації струму. Електрична дуга (час її горіння) безпосередньо пов'язано з електроерозійними явищами (глибиною проплавлення контакту). Формула для визначення глибини проплавлення отримана при рішенні рівняння теплопровідності з урахуванням граничних умов II роду та пов'язує величину глибини проплавлення з енергетичними та теплофізичними параметрами контактного матеріалу.

Ключові слова: *величина проплавлення, екологічно безпечний контактний матеріал, електромагнітний пускач, електрична дуга, теплопровідність, температура, коефіцієнт температуропровідності, теплоємність*

Актуальність. При комутації змінного струму електромагнітними пускачами 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]:

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

де $P_{\text{сеп}} = \frac{1}{6} U_0 I_0 \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0} \right)$ - середня потужність в контакт-деталях, яка визначається

$$\text{активною складовою навантаження } R_0, \text{ Вт}; \quad (2)$$

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].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важкі умови експлуатації електричних апаратів у сільському господарстві та численні фактори впливу утруднюють вибір контактного матеріалу для комутаційних апаратів. За останні роки зроблені спроби заміни контактного матеріалу Ag-CdO на менш токсичний. 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 [4].

Кількість тепла, необхідного для нагрівання контакт-деталі до температури плавлення Q_I діє на робочій поверхні [1, 2]. Тепло надходить перпендикулярно до поверхні і теплопровідність у всіх напрямках – однакова. Вважаємо, що тривалість потоків тепла Q_I 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 наступний вигляд [1]:

$$\frac{dT(x,t)}{dt} = a \cdot \frac{d^2T(x,t)}{dx^2}, \quad (t>0; 0<x<\infty) \quad (3)$$

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.

Розв'язок цього рівняння дає можливість визначити температуру в будь-якій точці контакт-деталі вздовж осі x (повздовжня вісь) в кожний визначений момент часу t , включаючи і точки, які знаходяться на робочій поверхні ($x=0$) в кінці проміжку комутації ($t=t_0$) (рис.1).

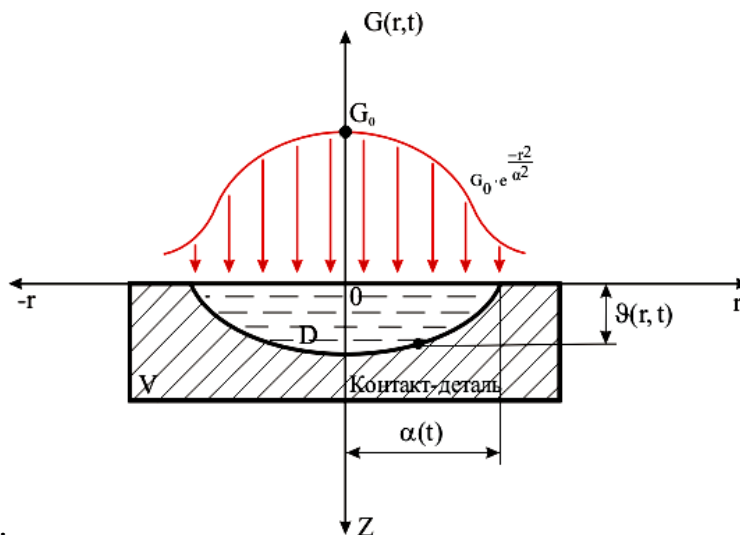


Рис. 1. Схематичне зображення розподілу теплового потоку G електричної дуги, що діє на робочій поверхні контакт-деталі:

$G_0 \cdot e^{-\frac{r^2}{\alpha^2}}$ – густина розподілу теплового потоку, який надходить через опорну пляму дуги (нормальний закон розподілу), $D\{z>0, r>\alpha(t)\}$ - зона плавлення та випаровування контактного матеріалу, $V\{z>z(r, t), 0<\alpha(t)<r\}$ - об'єм контакт-деталі, $\alpha(t)$ - радіус зони плавлення на робочій поверхні, $z(r, t)$ - межа розподілу твердої і рідкої фаз контактного матеріалу, r, z - циліндричні координати.

Метою дослідження є встановлення взаємозв'язку між ерозійними явищами при комутації (глибиною проплавлення) та енергетичними параметрами контактного матеріалу.

Матеріали і методи дослідження. Об'єкти експериментального дослідження - контакт-деталі електромагнітних пускачів ПМЛ-1100, що виготовлені з серійних (на основі срібла) і екологічно безпечних дослідних (на основі міді) контактних матеріалів [4]. Марки та склад матеріалів контактів наведено в табл. 1.

Осцилограми напруги і струму, які отримані під час дослідження, зроблені з використанням універсального двохпроменевого запам'ятовуючого осцилографу С8-14. Параметри комутації (час горіння дуги і середнє значення струму в дузі) визначалося за осцилограмами. Похибка вимірних величин не перевищує 5%. Математичні розрахунки проводяться з використанням програми «MathCAD 7 Professional».

Результати досліджень та їх обговорення. Наразі, коли діє джерело тепла у вигляді площини (рис. 1), розв'язок рівнянням (3) матиме вигляд [2]:

$$T = \frac{G}{2\sqrt{\pi at}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (4)$$

де G - сила імпульсного джерела тепла, яке розміщене в площині розмикання контакт-деталей безпосередньо на поверхні при $x=0$ (густина теплового потоку, який надходить до однієї контакт-деталі), м·К; x – координата точки, температура якої в момент t дорівнює T .

За формулою (4) визначається розподіл температур в об'ємі контакт-деталі, який викликаний джерелом тепла силою G , що розташований на площині при $x=0$. Кількість тепла q [Дж/м²], яка виділяється з одиниці площі джерела тепла у вигляді площини, між двома контакт-деталлями, дорівнює:

$$q = \frac{Q}{2f_0} = \frac{W}{2f_0} = G \cdot \gamma \cdot c, \quad (5)$$

де W – кількість електричної енергії (енергія дуги), Дж; Q – тепла енергія, яка надходить у контактну пару, кал (Дж); f_0 – площа контактної поверхні розплавленої лунки (умовна площа контактування), м².

За час комутації густина теплового потоку на поверхні однієї контакт-деталі складає:

$$G = \frac{W}{2\gamma c f_0}. \quad (6)$$

Після розв'язку рівняння теплопровідності (3), визначається розподіл температури T на глибину x від поверхні контакт-деталі за час t . Для визначення величини глибини проплавлення h вводиться поняття "ефективної температури" T_{ef} . Це температура, до якої була б нагріта розплавлена маса металу контакт-деталі при затратах на це теплоти, яка обумовлена прихованою теплотою плавлення:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot T_{\text{еф}} = m_1 \cdot g_1, \quad (7)$$

де g_1 – прихована теплота плавлення, Дж/кг; c_1 – теплоємність розплавленого металу, Дж/кг·К.

Для розрахунків з достатньою імовірністю вважається, що ця теплоємність c_1 дорівнює теплоємності нерозплавленого (холодного) металу, тобто $c = c_1$. і тоді ефективна температура визначається:

$$T_{\text{еф}} = \frac{g_1}{c}. \quad (8)$$

Якщо масу металу контакт-деталі m_1 довести до температури плавлення $T_{\text{пл}}$ та додати ще й сам процес розплавлення, то можна вважати це рівноцінно доведенню до загальної температури плавлення $T_{\text{пл}}$ і ефективної температури $T_{\text{еф}}$ всієї розплавленої маси m_1 . Тоді розрахункова температура плавлення:

$$T_{1\text{розр}} = T_{\text{пл}} + T_{\text{еф}} = T_{\text{пл}} + \frac{g_1}{c}. \quad (9)$$

Межа в тілі контакт-деталі $\vartheta(r, t)$, температура точок якої досягла $T_{1\text{розр}}$, обмежує розплавлену частину металу і є, фактично, глибиною лунки розплавлення h_1 (рис. 1). Глибина цієї лунки визначається координатою x (формула (4)). Тепло Q_2 доводить частку металу в лунці до температури кипіння $T_{\text{кип}}$. Тоді розрахункова температура кипіння:

$$T_{2\text{розр}} = T_{\text{кип}} + \frac{g_2}{c_1}, \quad (10)$$

де g_2 – прихована теплота випаровування матеріалу контакт-деталі (пароутворення), Дж/кг.

При цьому межі лунки h_2 , в якій метал кипить $\vartheta(r, t)$, будуть визначатися теж координатою x , але меншою ніж h_1 . Для металу, який випаровується, межа лунки h_3 ($h_3 < h_2 < h_1$).

Отже, розрахункова температура випаровування матеріалу контакту:

$$T_{3\text{розр}} = T_{\text{кип}} + \frac{g_1}{c} + \frac{g_2}{c_1}. \quad (11)$$

Розв'язок рівняння теплопровідності (3) визнається:

$$e^{-\frac{h_i^2}{4at}} = \frac{T_{i\text{розр}} \cdot 2\sqrt{\pi at_0}}{G}, \quad (12)$$

де h_i – глибина зони плавлення або кипіння або випаровування, координата точок, температура яких досягає $T_{i\text{ розр}}$ до кінця часу горіння дуги t_0 .

Якщо використати формулу (6), то отримуємо формулу:

$$e^{\frac{h^2}{4at}} = \frac{W}{4\sqrt{\pi \cdot a \cdot t_0 \cdot \gamma \cdot c \cdot f_0 \cdot T_{\text{розр}}}}, \quad (13)$$

де $W = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega$ - з формули (1).

Від значення глибини проплавлення h залежить і площа контактної поверхні при плавленні f_0 (згідно експериментальну) [3]:

$$h_1 = 0,3 \cdot d_1, \quad (14)$$

де d_1 – діаметр розплавленої зони.

З урахуванням декількох припущень отримуємо вираз для площі:

$$f_0 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{h_1}{0,3}\right)^2}{4} = 8,727 \cdot h_1^2 = \psi h_1^2, \quad (15)$$

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

Визначення величини глибини проплавлення h зводиться до розв'язку рівняння, при цьому використовуємо формули (1) і (15). Після проведення математичних перетворень величина глибини проплавлення визначається:

$$h^2 \cdot e^{\frac{h^2}{4at}} = \frac{U_0 I_0 \omega \cdot \sqrt{t_0}}{4\psi b T_{\text{розр}}}, \quad (16)$$

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

Коефіцієнт b для екологічно безпечних контактних матеріалів за нашими розрахунками наведений у табл. 1.

$$b = (50 \div 67) \cdot 10^3 \frac{\text{Джс}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{\frac{1}{2}}}. \quad (17)$$

Для реальних контактних матеріалів (мідь, срібло, СрН-90) коефіцієнт температуропровідності становить $a = (1,164 \dots 1,689) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Час горіння електричної дуги t_0 в низьковольтних електромагнітних пускачах змінного струму становить не більше одного напівперіоду синусоїди (рис. 2), а час розмикання контакт-деталей знаходиться в межах $t = 0,02\text{с} = 20\text{мс}$. За технічними даними

документів [1], повний час вмикання пускачів ПМЛ-1100 складає приблизно $t_{1новн}=17$ мс, а ПМЛ-2100 - $t_{2новн}=22$ мс.

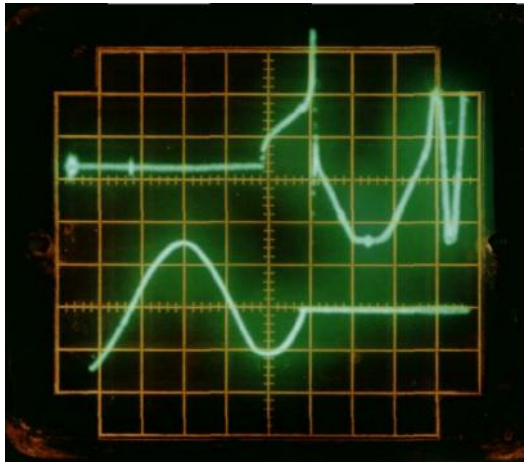


Рис. 2. Осцилограма розмикання електромагнітного пускача ПМЛ-1100.

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

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

Здійснюємо обчислення величини $e^{\frac{h^2}{4at_0}}$, підставляючи наведені числові значення і констатуємо, що вона майже дорівнює одиниці. Тому, з урахуванням деяких припущень, величина глибини проплавлення однієї контакт-деталі визначається:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\psi b T_{розр}}}. \quad (18)$$

Деякі теплофізичні характеристики та розрахункові температури плавлення та кипіння для серійних і екологічно безпечних дослідних контактних матеріалів, а також числові значення глибини проплавлення наведено в табл. 1 та табл. 2, згідно даних яких побудовано графіки залежності значення глибини проплавлення від часу горіння дуги (рис. 3, рис. 4).

1. Теплофізичні характеристики і розрахункові температури для контактних матеріалів

Контактний матеріал	Теплофізичні характеристики і розрахункові температури									
	λ , Вт/м·К	$\gamma, \times 10^3$ кг/м ³	$a_1, \times 10^{-4}$ м ² /с	$\frac{c}{c_1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$T_{\text{пл}},$ °С	$T_{\text{кип}},$ °С	$\frac{q_1}{q_2}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$b, \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1/2}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$T_{1\text{розр}},$ °С	$T_{2\text{розр}},$ °С
1. Ag (100%)	440	10,5	1,783	$\frac{235}{290}$	960,8	2180	$\frac{88}{2350}$	58402	1335	10283
2. СрН-90	384	10,1	1,475	$\frac{257,5}{317,8}$	1010	2262	$\frac{109,8}{2836}$	56013	1436	11187
3. СрМ-0,2+М1	350	10,49	1,417	$\frac{235}{290,5}$	961	2181	$\frac{93}{2357,9}$	52105	1357	10298
4. Cu (100%)	406	10,5	1,164	$\frac{390}{481,3}$	1083	2380	$\frac{214}{5410}$	66687	1632	11241
5. 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	18327
6. 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	15503
7. 86,3%Cu+5,0%Cr+3,0% +TiB ₂ +3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr	376,8	8,56	1,12	$\frac{393}{484,9}$	1278	2496	$\frac{222,8}{6795,8}$	63101	1845	16511
8. 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	16599

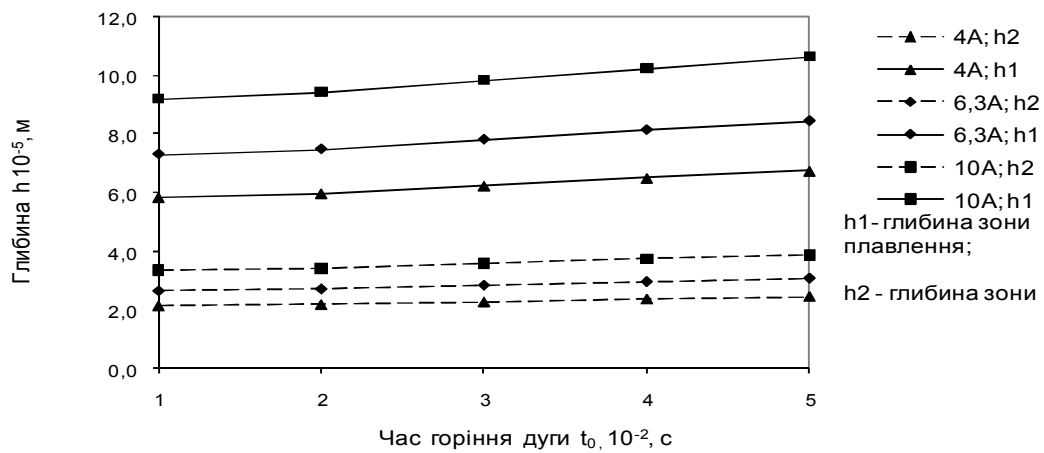


Рис.3. Значення глибини проплавлення контакт-деталі пускача при різних величинах струму. Матеріал CrM-

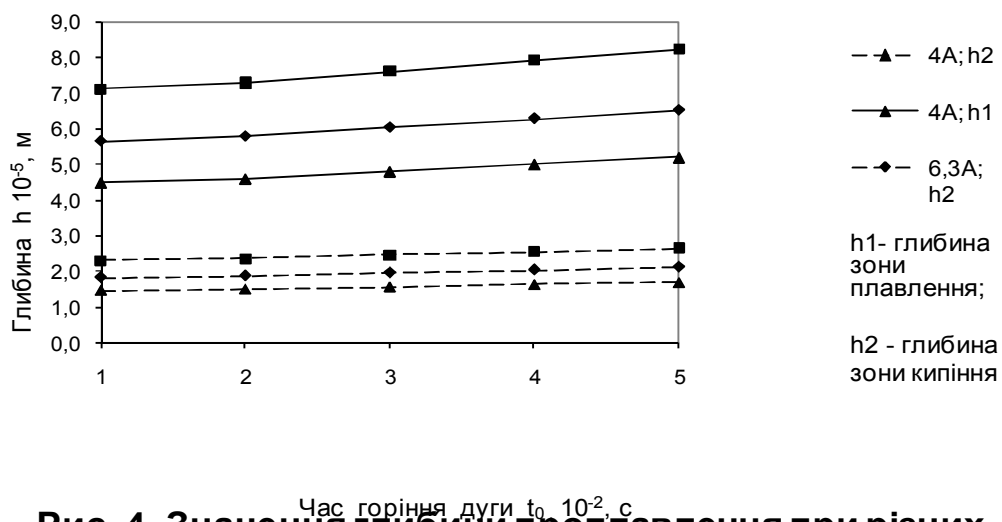


Рис. 4. Значення глибини проплавлення при різних величинах струму. Матеріал 78%Cu+15%Mo+3%MoO₃+3%C+1,0%Ni.

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. Ag (100%)	$T_{1розр}$	I=4	5.545e-5	5.678e-5	5.930e-5	6.181e-5	6.415e-5
		I=6,3	6.958e-5	7.126e-5	7.442e-5	7.757e-5	8.051e-5
		I=10	8.767e-5	8.977e-5	9.376e-5	9.773e-5	1.014e-4
	$T_{2розр}$	I=4	1.998e-5	2.046e-5	2.137e-5	2.227e-5	2.312e-5
		I=6,3	2.513e-5	2.573e-5	2.687e-5	2.801e-5	2.907e-5
		I=10	3.438e-5	3.52e-5	3.677e-5	3.832e-5	3.978e-5
2. CpH-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
3. CpM-0,2+M1	$T_{1розр}$	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
4. Cu (100%)	$T_{1розр}$	I=4	4.694e-5	4.807e-5	5.020e-5	5.233e-5	5.431e-5
		I=6,3	5.891e-5	6.032e-5	6.300e-5	6.567e-5	6.816e-5
		I=10	7.422e-5	7.600e-5	7.937e-5	8.274e-5	8.587e-5
	$T_{2розр}$	I=4	1.788e-5	1.831e-5	1.913e-5	1.994e-5	2.069e-5
		I=6,3	2.244e-5	2.298e-5	2.4e-5	2.502e-5	2.597e-5
		I=10	2.828e-5	2.896e-5	3.024e-5	3.152e-5	3.272e-5
5. 83%Cu+ +10%Mo+%3MoO 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
6. 86,5%Cu+ +12%Nb+1,0%Zr+ +0,5%Y ₂ O ₃	T_{1p}	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_{2p}	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
7. 86,3%Cu+ +5,0%Cr+3,0%TiB ₂ + +3,0%Nb+2,0%C+ +0,7%Zr	T_{1p}	I=4	4.538e-5	4.647e-5	4.853e-5	5.058e-5	5.250e-5
		I=6,3	5.695e-5	5.831e-5	6.090e-5	6.348e-5	6.589e-5
		I=10	7.174e-5	7.347e-5	7.673e-5	7.998e-5	8.301e-5
	T_{2p}	I=4	1.517e-5	1.553e-5	1.622e-5	1.691e-5	1.755e-5
		I=6,3	1.904e-5	1.950e-5	2.036e-5	2.122e-5	2.203e-5
		I=10	2.399e-5	2.456e-5	2.565e-5	2.674e-5	2.775e-5
8. 81,3%Cu+ +10%Cr+3,0%TiB ₂ + +3,0%Nb+2,0%C+ +0,7%Zr	T_{1p}	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_{2p}	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

Висновки і перспективи. 1. Ерозійна стійкість і величина глибини проплавлення контактів h є функцією енергетичних, теплофізичних характеристик контактного матеріалу, розрахункової температури розплавлення, кипіння, випаровування контактного матеріалу.

2. Глибина проплавлення контактів залежить від енергетичних характеристик електричної дуги, в першу чергу від значення комутованого струму (4; 6,3; 10А) 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 %).

Список літератури

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

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

3. Jones F.L. The Physics of Electrical contacts / F.L.Jones. – Oxford: Clarendon Press, 1957. – 323.

4. Korobskiy V.V. 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) / V.V.Korobskiy, A.M.Mrachkovskiy // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – Ivano–Frankivsk (Ukraine), May 21-25, 2018, – P. 35.

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.

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, Ukraine: Publisher USHA, 110/II, 61-71.

3. Jones, F.L. (1957). The Physics of Electrical contacts. Oxford: Clarendon Press, 323.

4. 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.

ГЛУБИНА ПРОПЛАВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ КАК ФУНКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО МАТЕРИАЛА

В. В. Коробский, В. Г. Туцкий

Аннотация. *Исследуются контакты пускателей типа ПМЛ с токовой нагрузкой 4, 6,3; 10 А. При исследованиях использовались контакт-детали пускателей, изготовленные из серийных контактов на основе серебра и экологически безопасные исследовательские контакты на основе меди. Приведена формула для определения величины глубины проплавления при однократной коммутации тока. Электрическая дуга (время ее горения) непосредственно связана с электроэрозионными явлениями (глубиной проплавления контакта). Формула для определения глубины проплавления полученная при решении уравнения теплопроводности с учетом граничных условий второго рода и связывает величину глубины проплавления с энергетическими и теплофизическими параметрами контактного материала.*

Ключевые слова: *величина проплавления, экологически безопасный контактный материал, электромагнитный пускатель, электрическая дуга, теплопроводность, температура, коэффициент температуропроводности, теплоемкость*

CONTACT MELTING DEPTH AS A FUNCTION OF ENERGY AND HEAT PHYSICAL PARAMETERS OF CONTACT MATERIAL

V. Korobskiy, V. Tutskiy

Abstract. *The contacts of the PML starters with a current load of 4; 6.3; 10A. In the course of research, contact-parts of starter actuators made of serial contacts on the basis of silver and environmentally friendly research contacts on the basis of copper were used. The formula for determining the value of the depth of melting at a single switching current is given. The electric arc (the time of its burning) is directly related to the electroresive phenomena (the depth of the contact's melting point). The formula for determining the depth of the melting is obtained by solving the heat equation with the account of the*

limiting conditions of the second kind and the depth of the melting with the energy and thermophysical parameters of the contact material.

Keywords: *amount of melting, ecologically safe contact material, electromagnetic starter, electric arc, thermal conductivity, temperature, coefficient of temperature conductivity, heat capacity*