8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
9. Пригожин И. Химическая термодинамика / И. Пригожин, Р. Фей. – Новосибирск: Наука, 1966. – 509 с.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1976, Т.1. – 536 с.

Наведено метод дослідження теплообмінних процесів та гідродинаміки багатокомпонентних систем на основі положень нерівноважної термодинаміки.

Багатофазне середовище, дифузія, генерація ентропії, тензорні функції, термодинамічна сила, термодинамічні потоки, турбулентний рух.

A method for the study of hydrodynamics and heat transfer processes of multicomponent systems on the basis of non-equilibrium thermodynamics.

Multiphase medium, diffusion, the generation of entropy, tensor functions, the thermodynamic force, the thermodynamic flows, turbulent motion.

УДК 621.762

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ГЛИБИНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

І.П. Радько, кандидат технічних наук

Розглянуто метод визначення проплавлення контакт-деталей за допомогою рівняння теплопровідності в сферичних координатах. Показано, що розміри основи дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, тому розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методу точкового джерела. Визначено розподіл температури електричної дуги за час її горіння при комутації струму.

Контакт-деталь, електрична дуга, теплопровідність, напруга, електричний струм.

Мета досліджень – вдосконалення математичної моделі теплових процесів комутаційних апаратів.

Матеріали та методика досліджень. Використано параметри дуги та метод теплового балансу енергії електричної дуги при комутації струму електричних апаратів.

Результати досліджень. Вперше обраховано величину глибини проплавлення, електричну ерозію, термін служби контактів з дослідженими матеріалами порошкової металургії та потужність електричної дуги.

$$P = a \cdot gradT_{ct} + \lambda G - GT_{ct}^4, \tag{1}$$

де Р – потужність, що виділяється в дузі, Вт; α – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{м^2}{c}$; T_{ct} – гранична температура нагріву,°C; λ – скрита теплота випаровування, °C; G – постійна закону Стефана-Больцмана.

В основу методу визначення глибини проплавлення контакт-деталей покладено рівняння теплопровідності в сферичних координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{2\partial T}{r\partial r}), \qquad (2)$$

де *Т* – температура маси контакт-деталі, яка нагрівається, °С; t – час дії енергії дуги, с; α – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{м^2}{c}$; *r* – відстань від опорної плями (основи) дуги, м.

Оскільки розміри основної дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, то розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методів точкового джерела.

Розв'язок рівняння (2) знайдемо так. Введемо заміну змінних:

$$U = Tr; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial Tr}{\partial t}; \ \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial t}; \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{T}{r}; \qquad (5)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial(r\partial T)}{\partial r^2} = \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial r\partial T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 Tr}{\partial r^2} = 2\frac{\partial T}{\partial r} + r\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}. \qquad (6)$$

Підставляючи (4), (5), (6) у рівняння (2), отримаємо :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = r\frac{\partial T}{\partial t} \text{(4)}; \ \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{T}{r} \text{(5)}; \ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{r}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r} \text{(6)};$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha(\frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{2\partial T}{r\partial r} + \frac{2\partial T}{r\partial r}) = \frac{\alpha}{r}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2};$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}. \qquad (7)$$

Опорну пляму дуги ми розглядаємо у вигляді кулі радіусом *R*, розміщеної всередині контакту, розміри якого набагато разів більше радіуса *R* (необмежене середовище). Початкова температура кулі 0 < r < *R* рівна T_0, а в області $r > R$ температура дорівнює нулю. Таким чином, рівняння (7) розглядається при таких граничних умовах:

$U = T_0 r$, коли $t = 0$ при $0 < r < R$;

$U = 0$, коли $t \neq 0$ при $r < R$;

$U = 0$ коли $t = 0$ при $r > R$.

Розв'язок рівняння (7) у цьому випадку буде таким:

$$T=\frac{T_0}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R r'[l^{-\frac{(r-r')^2}{4at}}+l^{-\frac{(r-r')^2}{4at}}]\partial r'=\frac{T_0}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R r'l^{-\frac{(r')^2}{4at}}(l^{-\frac{rr'}{2at}}+l^{-\frac{rr'}{2at}})\partial r'. \qquad (8)$$

Використовуючи малість R, розкладемо підінтегральну функцію в ряд за ступенями r і обмежимо першими 3-ма членами розкладу:

$$l^{-\frac{(r')^2}{4at}}=1-\frac{(r')^2}{4at}\pm\frac{(r')^4}{32a^2t^2}; \qquad (8')$$

$$l^{-\frac{rr'}{2at}}=1+\frac{rr'}{2at}+\frac{r^2(r')^2}{8a^2t^2}; \qquad (8'')$$

$$l^{-\frac{rr'}{2at}}=1-\frac{rr'}{2at}+\frac{r^2(r')^2}{8a^2t^2}. \qquad (8''')$$

Після підстановки (8'), (8''), (8''') в (8) отримаємо :

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R(r'-\frac{(r')^3}{4at}+\frac{(r')^5}{32a^2t^2})(2+\frac{r^2(r')^2}{4a^2t^2})\partial r'=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R[2r'+\frac{(r')^3}{4at}(-1+\frac{r^2}{2at})+\frac{(r')^5}{16a^2t^2}(1-\frac{r^2}{2at})]\partial r' \qquad (9)$$

Після інтегрування (9) прийме вигляд :

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}[R^2+\frac{R^4}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})+\frac{R^6}{96a^2t^2}(1-\frac{r^2}{2at})]; \qquad (10)$$

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}R^2[1+\frac{R^2}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})]. \qquad (11)$$

Знайдемо розподіл температур T цього джерела для випадку кінцевого часу. Для цього скористаємось відомим співвідношенням:

$$mcdT=qIUdt \qquad (12)$$

де m – маса джерела (плями), г; c – питома теплоємність, $\frac{Дж}{кг\cdot град}$; I – струм дуги, А; U – падіння напруги в дузі, В; q – електротермічний еквівалент, $\frac{кал}{дж}$.

Визначимо звідси *E*, значення якого підставимо в (11), та інтегруючи по t від 0 до t, отримаємо:

$$T=\frac{3qIUR^2}{2r\sqrt{\pi a\pi R^3}\gamma c}\int_0^t\frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}[1+\frac{R^2}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})]\partial t=$$

$$=\frac{3qIU}{8rR\gamma\pi c\sqrt{\pi a}}\left[\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}\partial t'-\frac{R^2}{8a}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}\partial t'+\frac{R^2r^2}{16a^2}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{5}{2}(t-t_1)}\partial t'\right]. \qquad (13)$$

Залишилось знайти три інтеграли.

1-й інтеграл:

$$\int_0^t \frac{l^{-\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{1}{2}(t-t')}\partial t'.$$

Скориставшись заміною змінних:

$$\frac{1}{\frac{1}{2}(t-t_1)}=\sigma;\ \partial\sigma=\frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t=0 \qquad \sigma=t^{-\frac{1}{2}};$$

$$t=t \qquad \sigma=\infty,$$

будемо мати:

$$2\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty}\frac{l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}}{\sigma^2}\partial t=2\sqrt{t}l^{-\frac{r^2}{4at}}-\frac{r^2}{a}\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}\partial t=2\sqrt{t}l^{-\frac{r^2}{4at}}-\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\frac{r^2}{a}\left[1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \qquad (14)$$

2-й інтеграл:

$$\int_0^t \frac{l^{-\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{3}{2}(t-t')}\partial t'.$$

Введемо заміну змінних:

$$\frac{1}{\frac{1}{2}(t-t')}=\sigma; \qquad \partial\sigma=\frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t=0 \qquad \sigma=t^{-\frac{1}{2}};$$

$$t=t \qquad \sigma=\infty,$$

$$2\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}\partial t'=2\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\left[1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \qquad (15)$$

3-й інтеграл:

$$\int_0^t \frac{l^{-\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{3}{2}(t-t')}\partial t'.$$

$$\frac{1}{\frac{1}{2}(t-t')}=\sigma\,; \qquad \partial\sigma=\frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}}\,;$$

$$t=0 \qquad \sigma=t^{-\frac{1}{2}}\,;$$
$$t=t \qquad \sigma=\infty\,,$$

$$2\int_0^t \sigma^2 l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}\partial\sigma=2\frac{1}{2}\int_{\frac{1}{t}}^{\infty}\sigma l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}\partial\sigma^2=$$

заміна змінних $\sigma^2=x\,;\sigma=\frac{1}{\sqrt{t}}\,;\sqrt{x}=\frac{1}{\sqrt{t}}\,;x=\frac{1}{t}$

$$=\int_{\frac{1}{t}}^{\infty}\sqrt{x}l^{-\frac{r^2}{4at}x}\partial x=$$

Інтегруючи частинами

$$\sqrt{x}=U\,;\frac{1}{2\sqrt{x}}\partial x=\partial U\,;$$

$$l^{-\frac{r^2}{4a}x\partial x}=\partial V\,;$$

$$-\frac{4a}{r^2}l^{-\frac{r^2}{4a}x}=V\,;$$

$$=\sqrt{x}\left(-\frac{4a}{r^2}l^{-\frac{r^2}{4a}x}\right)l^{-\frac{r^2}{4a}x}\int_{\frac{1}{t}}^{\infty}-\int_{\frac{1}{t}}^{\infty}-\frac{4a}{r^2}l^{-\frac{r^2}{4a}x}\frac{1}{2\sqrt{x}}\partial x=\frac{4a}{r^2}\frac{1}{\sqrt{1}}l^{-\frac{r^2}{4at}}+\frac{4a}{r^2}\left[\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\left\{1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right\}\right] \quad (16)$$

Підставляючи значення інтегралів (14), (15), (16) в (13), будемо мати:

$$T=\frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a}R\gamma c}\left(2\sqrt{t}l^{-\frac{r^2}{4at}}+\frac{r^2}{a}\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}[1-\varphi]-\frac{2R^2}{4a}\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}[1-\varphi]\right)+$$

$$+\frac{4aR^2r^2}{16a^2r^2}\frac{1}{\sqrt{t}}l^{-\frac{r^2}{4at}}+\frac{4a}{r^2}\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\frac{R^2r^2}{16a^2}[1-\varphi]=$$

$$=\frac{3qIUR^2}{8\pi\sqrt{\pi a R^2}\gamma c}\left\{\left(2\sqrt{t}+\frac{R^2}{4a\sqrt{t}}\right)l^{-\frac{r^2}{4at}}-[1-\varphi]\left(\frac{r^2\sqrt{\pi a}}{4ar}\frac{a^2\sqrt{\pi a}}{4ar}\right)\right\}.$$

$$T=\frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a}R^2\gamma c}\left[\frac{1}{r}l^{-\frac{r^2}{4at}}\left(2\sqrt{t}+\frac{R^2}{4at}\right)-\sqrt{\frac{\pi}{a}}\left(1-\varphi\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \qquad (17)$$

При цьому видно, що температура контакту не може бути вище деякої максимальної.

Максимальна температура поверхні електродів нами визначена із рівнянь теплового балансу енергії на електроді за формулою (1). Наведена оцінка показала, що максимальна температура поверхні контакт-деталей становить 2400 К, що близько до температури випаровування срібла.

Глибина проплавлення матеріалу контакт-деталей залежить від енергії дуги, фізико-механічних властивостей контактного матеріалу, часу горіння дуги і визначається за виразом:

$$r = 0{,}17\sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{bT}}\,, \tag{18}$$

де U_0 – напруга джерела живлення, В; I_0 – струм навантаження, А; t_0 – час розмикання контакт-деталі, с; $b = \sqrt{\pi\lambda\gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається теплофізичними властивостями контактного матеріалу, Дж/(м^{2}Кс$^{1/2}$); Т – розрахункова температура плавлення, К.

Як видно з формули (18), на глибину проплавлення контактного матеріалу впливає і час горіння дуги t_0 при комутації струму. Тому, можна визначити оптимальний час розмикання контакт-деталей $t_{опт}$, при якому глибина проплавлення та ерозії будуть мінімальні:

$$t_{опт} = \frac{\pi\lambda\gamma S^2 T^2}{P_{сер}^2}\,, \tag{19}$$

де S – оцінка контакту, на яку діє енергія електричної дуги, мм; $P_{сер}$ – середнє значення потужності дуги, Вт.

Оцінка граничної глибини проплавлена за формулою (18) показала, що її величина становить 0,5 мм.

Розглядаючи мікроструктуру поздовжнього розрізу електродів можна помітити, що глибина проплавлення становить у середньому 0,6 мм.

Таким чином, збіг даних розрахунку з експериментальними даними є задовільним, враховуючи оціночний розрахунок.

Висновки

Глибина проплавлення матеріалу контактів залежить від енергії дуги, електроерозійних властивостей матеріалу контактів, часу горіння електричної дуги і визначається за формулою:

$$h = \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{2\psi T_p l_0}}\,, \tag{20}$$

де ω – коефіцієнт, що характеризує тип навантаження і залежить від співвідношення активного опору споживача R_0 та його індуктивності L, а також залежить від часу розмикання контактів t_0:

$$\omega = \frac{R_0 t_0}{L}, \qquad (21)$$

де ψ – коефіцієнт, який враховує співвідношення між розмірами контактів; T_p – розрахункова температура плавлення контактного матеріалу, К; $b = \sqrt{\pi \lambda \gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається фізико-механічними характеристиками матеріалу контактів, Дж/(м^{2}Кс$^{1/2}$); U_0 – напруга джерела струму, В; I_0 – сила струму споживача, А; t_0 – час розмикання контакт-деталі, с.

Внаслідок проведеного розрахунку була встановлена залежність строку служби контактів від кількості електрики перенесеної в дузі.

Список літератури:

1. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей/ Буткевич Г.В. – М.: Энергия 1973. – 172 с.
2. Буткевич Г.В. К вопросу износа контактов электрических аппаратов под. действием дуги / Буткевич Г.В. // Тр. МЭИ. – 1965. – Вып. 64. – С. 261–269.
3. Декабрун Н. Е. Контакты аппаратов низкого напряжения / Декабрун Н.Е. – М.: Энергия, 1970. – 327 с.
4. Кобленц М. Г. Исследование электрической износоустойчивости контакторов / Кобленц М.Г. // Электротехника. – 1966. – №1.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. – М.: Высш. шк., 1967. – 250 с.
6. Хольм Р. Электрические контакты / Хольм Р. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1961. – 464 с.

Рассмотрено метод определения проплавления контакт-деталей при помощи уравнения теплопроводимости в сферических координатах. Показано, что размеры основания дуги очень маленькие по сравнению с поверхностью контакт деталей, поэтому расчет теплового режима контакт-детали производится с использованием метода точечного источника. Определено распределение температуры электрической дуги за время горения при коммутации тока.

Контакт-деталь, электрическая дуга, теплопроводимость, напряжение, электрический ток.

Consider the method of determination of melting the contact details of the equation of heat conduction in spherical coordinates. The calculation of the thermal regime the contact parts are manufactured by the method of a point source as the sizes of the base arc is very small compared to the surface of the contact details. Been determined the temperature distribution of the arc during combustion at current commutation.

Contact details, electric arc, thermal, voltage, electric current.