

Стебелецька Н.М.Бережанський агротехнічний інститут,
м. Бережани, Україна
E-mail: stebeletska@ukr.net**ОБґРУНТУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ
ЗМІНИ ТЕМПІВ НАГРІВАННЯ
ФРИКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
СТРІЧКОВО - КОЛОДКОВОГО ГАЛЬМА**

УДК 621.891

У роботі представлено визначення темпів нагрівання фрикційних елементів стрічково-колодкового гальма на основі рівняння теплового балансу при різних початкових і граничних умовах, які враховують процес тепловиділення при гальмуванні, та встановлено взаємозв'язок між темпами нагрівання обода гальмівного шківів та фрикційної накладки і градієнтами температур, як по їх поверхнях так і по товщині. Картину темпів нагрівання металевих та неметалевих фрикційних елементів важливо знати при удосконаленні існуючих та конструюванні нових гальмівних пристроїв, а також при дослідженні режимів експлуатації їхніх пар тертя.

Ключові слова: гальмівні пристрої, фрикційні елементи, пари тертя, темп нагрівання.

Вступ

Досвід експлуатації гальмівних пристроїв загального та спеціального машинобудування показує, що знософрикційні характеристики матеріалів їхніх пар тертя залежать, головним чином, від температурного режиму вузла тертя і перш за все від теплового стану приповерхневих шарів робочих елементів гальма.

Наявність високих температур і температурних градієнтів на поверхнях металевих і неметалевого фрикційних елементів, а також по їх товщині, призводять до зміни знософрикційних властивостей матеріалів їх пар тертя. В останніх відбуваються структурні перетворення, процеси зношування та руйнування.

Приповерхневий шар полімерного матеріалу накладки має нестабільні характеристики при температурах, що перевищують допустиму, оскільки при цьому в них відбуваються активні асорбційно-десорбційні процеси. На інтенсивність останніх суттєво впливає темп нагрівання металевих елементів тертя, особливо імпульсний та довготривалий режими підведення теплоти до них. Їхній рівень і тривалість негативно діють на ефективність гальмівних пристроїв. Крім того, темп нагрівання необхідно брати до уваги при виборі фрикційних матеріалів для накладок та визначенні конструктивних параметрів металевих елементів тертя.

Аналітичні дослідження закономірностей зміни темпів нагрівання фрикційних елементів стрічково - колодкового гальма

Оптимальне керування процесом тепловиділення при взаємодії металополімерних пар тертя стрічково-колодкового гальма необхідно з таких міркувань:

- обмежити кількість теплоти, генерованої ободом шківів, з метою зменшення термічного напруження;
- понизити поверхневу температуру полімерної накладки нижче допустимої для її матеріалів з метою попередження вигорання в них сполучних компонентів;
- забезпечити роботу фрикційних вузлів з прийнятною енергонавантаженістю з метою підвищення знософрикційних властивостей їх приповерхневих шарів;
- встановити взаємозв'язок між темпом нагрівання робочої поверхні обода шківів і градієнтами температури, як по його поверхні так і по товщині.

Складемо диференціальне рівняння балансу теплоти Q при гальмуванні фрикційними вузлами стрічково - колодкового гальма за час $d\tau$ [1]:

$$Qd\tau = cmd\Delta t + A_2\alpha_n\Delta t d\tau_1, \quad (1)$$

де c , m – теплоємність матеріалу і маса обода гальмівного шківів;

Δt – градієнт температури на поверхнях взаємодії;

A_2 – поверхня взаємодії мікроступів полімерної накладки;

α_n – коефіцієнт розподілу теплоти, що сприймається приповерхневим шаром полімерної накладки.

Приріст темпу нагрівання обода шківів складає:

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{1}{cm} (Q - A_2\alpha_n\Delta t) \quad (2)$$

З іншого боку генерована теплота при гальмуванні йде на нагрівання обода гальмівного шківів і розсіюється від його полірованої і матової поверхні A_1 , баланс якого можна записати у вигляді:

$$Q - A_2 \alpha_n \Delta t = A_1 \lambda \frac{\partial \Delta t}{\partial r}, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу обода шківів;

r – координата по радіусу обода шківів.

Права частина рівняння теплового балансу (3) є теплою, що йде в матеріал обода шківів на збільшення об'ємних температур при кожному гальмуванні. Для запобігання розтріскуванню поверхні обода шківів слід встановити максимальну величину градієнта температури, величина якого також залежить від темпу нагрівання обода шківів. [4]

Таким чином, темп нагрівання обода шківів є основним параметром, як з точки зору його нагрівання, так і виникнення великого термічного напруження (у рівняння входить градієнт температури), яким слід керувати при процесі гальмування.

Для ободев гальм, працюючих в повторно-короткочасному режимі, необхідно знати максимальну величину Q через яку виникають тріщини на робочих поверхнях обода шківів [2, 3].

Повна робота гальмування складається з суми робіт вузлів стрічково - колодкового гальма, які поступально і обертаються рухаються.

Вважаючи, що під час гальмування уся робота перетворюється на теплоту можна скласти рівняння теплового балансу:

$$W \Rightarrow Q; \quad Q = \frac{mc\Delta t}{1 - \alpha_n}. \quad (4)$$

Складемо рівняння керованого об'єкту, приймаючи керуючий параметр $b \frac{\partial t}{\partial r}$, враховуючи (3) в (4), отримаємо:

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{A_1 \lambda}{cm} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial r} = b \frac{\partial \Delta t}{\partial r} = U(r, z_T, t), \quad (5)$$

$$\text{де } b = \frac{A_1 \lambda}{cm};$$

z_T – координата по ширині обода шківів.

Спочатку необхідно розв'язати диференціальне рівняння теплопровідності для циліндричного диска обода шківів, що знаходиться в його середній частині як найбільш енергонавантаженого:

$$\frac{\partial \Delta \vartheta}{\partial \tau} = a_{uu} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Delta t}{\partial z_T^2} \right); \quad (6)$$

з початковим:

$$\Delta t(r, z_T, 0) = 0 \quad (7)$$

і граничним (при $r = R$):

$$A_1 \lambda \frac{\partial \Delta t}{\partial r} + A_2 \alpha_n \Delta t = Q \quad (8)$$

умовами, які враховують процес тепловиділення при гальмуванні;

де α_{uu} – коефіцієнт температуропровідності матеріалу обода шківів;

r – поточний радіус обода шківів;

R – радіус зовнішньої поверхні шківів;

$\frac{\partial \Delta t}{\partial r}$ – градієнт температури по радіусу. Умови (7) і (8) потрібні і достатні для вирішення диференціального рівняння (6) з використанням узагальненого параметра.

Переходячи до узагальненого параметра $x = \frac{r^2 + z_T^2}{d\tau}$ диференціальне рівняння (6) представляємо в такому вигляді:

$$4x \frac{d^2 \Delta t}{dx^2} + (6+x) \frac{d\Delta t}{dx} = 0. \quad (9)$$

Розв'язок рівняння (9) має вигляд:

$$\frac{d\Delta t}{dx} = C_1 e^{-\frac{1}{4}x} x^{-\frac{3}{2}}; \quad dt = C_1 \int e^{-\frac{1}{4}x} x^{-\frac{3}{2}} dx + C_2, \quad (10)$$

де C_1, C_2 – сталі диференціювання.

Таким чином, використання узагальненого параметра дозволяє замість чотирьох граничних і однієї початкової умови використати лише дві граничні умови, згідно (7) і (8), яка записується у вигляді:

$$1. \Delta t(\infty) = 0;$$

$$2. C_1 \left[\frac{2R^2}{R^2 + z_T^2} \cdot \frac{e^{-\frac{1}{4}x_0}}{\sqrt{x_0}} - kB_i \int_{x_0}^{\infty} e^{-\frac{x}{4}} x^{-\frac{3}{2}} dx \right] = \frac{QR}{A_1 \lambda}, \quad (11)$$

де $kBi = A_2 \alpha_n \tau / A_1 \lambda$;

Bi – критерій Біо;

$k = A_2 / A_1$.

З першої умови (11) визначаємо C_2

$$C_2 = -C_1 \left(\int_x^{\infty} e^{-\frac{x}{4}} x^{-\frac{3}{2}} dx \right)_{x=\infty}; \quad (12)$$

підставляючи друге рівняння (11), отримуємо:

$$C_1 = \frac{\frac{QR}{A_1 \lambda}}{\frac{2R^2}{R^2 + z_T^2} \cdot \frac{e^{-\frac{1}{4}x_0}}{\sqrt{x_0}} - kB_i \int_{x_0}^{\infty} e^{-\frac{x}{4}} x^{-\frac{3}{2}} dx}, \quad (13)$$

$$\text{де } x_0 = \frac{R^2 + z_T^2}{dt}.$$

Невласний інтеграл у виразах (9, 10 і 12.) можна представити у вигляді:

$$\int_{x_0}^{\infty} e^{-\frac{x}{4}} x^{-\frac{3}{2}} dx = \frac{2e^{-\frac{x}{4}}}{\sqrt{x}} - \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi}} \cdot 2 \int_{\frac{\sqrt{x}}{2}}^{\infty} e^{-z^2} dz = \frac{2e^{-\frac{x}{4}}}{\sqrt{x}} - \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{x}}{2} \right), \quad (14)$$

у якому останній член є інтегралом вірогідності Гауса який має вигляд:

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\sqrt{x}}{2}}^{\infty} e^{-z^2} dz = \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{x}}{2} \right). \quad (15)$$

Для великих значень аргументу функцію (15) розкладаємо в ряд і при цьому з достатньою точністю обмежуємося тільки двома членами ряду:

$$\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{x_0}}{2} \right) = 2 \frac{e^{-\frac{x}{4}}}{\sqrt{\pi x_0}} \left(1 - \frac{2}{x_0} \right). \quad (16)$$

Враховуючи (16) у виразі (13) і те, що $R^2 \gg z_T^2$ можна спростити постійну C_1 і представити її у вигляді:

$$C_1 = \frac{QR}{2A_1\lambda} \cdot \frac{\sqrt{x_0} e^{-\frac{1}{4}x_0}}{R^2 + \frac{2kBi}{x_0}} \approx \frac{QR}{2A_1\lambda} \cdot \frac{x_0 \sqrt{x_0} e^{-\frac{1}{4}x_0}}{x_0 + 2kBi} \quad (17)$$

Підставляючи (17) в (10) і після деяких перетворень отримуємо рівняння для керуючої функції:

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{A_1\lambda}{cm} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial l_{об}} = \frac{QrR}{cm(R^2 + z_T^2 + 2kBi \cdot d\tau)} \quad (18)$$

Проте, в залежності (18) необхідно ввести величину b , тобто товщину поверхневого і приповерхневого шарів фрикційних елементів для точнішої оцінки їхньої нагрітості. Для цього скористаємося підстановкою $a = \lambda/(c\rho)$ (де ρ – густина фрикційних матеріалів) і $V = A_1\delta$ (де V – об'єм фрикційного матеріалу). В результаті підстановок і перетворень отримуємо

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{a_{uu}}{b_{uu}} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial b_{uu}} = \frac{QrR}{cm(R^2 + z_T^2 + 2kBi \cdot d\tau)} \quad (19)$$

Проведемо аналіз залежності (18) за параметрами. Збільшення робочої (полірованої) площі обода шківа сприяє зростанню його металоемності, і як наслідок, моменту інерції. Збільшення коефіцієнта теплопровідності, а разом з ним і температуропровідності матеріалів обода шківа викликає швидке прогрівання по його товщині, і як наслідок, зменшення температурного градієнта. Якщо позначити постійний доданок $\frac{A_1\lambda}{cm} = b$, то встановимо зв'язок між темпом нагрівання $\left(\frac{d\Delta t}{d\tau}\right)$ і градієнтом температури

$\left(\frac{\partial \Delta t}{\partial b_{uu}}\right)$, що має місце на робочій поверхні обода шківа.

Що стосується залежності (19), то тут дещо інша картина. Значення закономірності зміни коефіцієнта температуропровідності матеріалів обода шківа від температури, а також часу проникнення теплоти в шари обода шківа дозволяє точніше, ніж в першому випадку визначити відношення (a_{uu}/b_{uu}) . При цьому використовується залежність, запропонована А.В. Чичинадзе, вигляду $b_{uu_{ef}} = 1,73\sqrt{a_{uu}\tau}$ (для обода шківа) і $b_{n_{ef}} = 1,73\sqrt{a_{uu}\tau}$ (для полімерної накладки) для визначення ефективної глибини проникнення теплоти в тіло обода і накладки при тривалому та імпульсному режимах.

Виконані розрахунки за залежностями (18) і (19) дозволять встановити закономірності зміни темпу нагрівання обода гальмівного шківа та фрикційної накладки при імпульсному та довготривалому режимах підведення теплоти в зону контактування пар тертя стрічково-колодкового гальма від зміни температури по їхніх поверхнях та товщині від температурних градієнтів, які виникають у елементах.

Висновки

Таким чином, у роботі показано як аналітичним шляхом визначається темп нагрівання пар тертя стрічково-колодкових гальм, а також встановлено закономірності зміни темпів нагрівання елементів тертя в залежності від температурних градієнтів, які виникають на їхніх робочих поверхнях.

Література

1. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника); под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2003. – 575 с.
2. Кіндрачук М.В. Трибология / М.В. Кіндрачук, В.Ф.Лубенець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту: “НАУ - друк”. – 2009. – 392 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Стрічково-колодкові гальма / [С.І. Крижанівський, М.О. Вольченко, Д.О. Вольченко та ін.]. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – Том 2. – 2007. – 215с.
5. Чичинадзе А.В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, А.Г. Гинзбург, З.В. Игнатьев. – М.: Наука, 1989. – 267 с.

Поступила в редакцію 30.11.2015

Stebeletska N.M. Foundation patterns of change rate of heating frictional elements of drum brake.

The paper presents determining rates of frictional heating elements of drum brake based on thermal balance equation with different initial and boundary conditions. It takes into account the process of thermal emission during braking. It is established interrelation between rates of heating pulley rim brake and frictional slip and gradients of temperatures both on their surfaces and thickness. It is important to know a picture of rates of heating of metal and nonmetallic frictional elements at improving existing and construction of new braking devices as well as study their modes of operation of friction pairs.

Keywords: brake mechanisms, frictional elements, friction units, rate of heating.

References

1. Chichinadze A.B. Trenye, iznos and smazka (Tribologia and tribotekhnika); pod. red. A.V. Chichinadze. M. Mashinostroenie, 2003. 575 s. [in Russian]
2. Kindrachuk M.V., Lubenets V.F., Pashechko M.I., Korbut E.V. Tribologia. Kyiv. Izdatelstvo nats. aviation. Univ. "NAU - printing", 2009. 392 s. [in Ukrainian]
3. Krahelskiy I.V. Trenye and iznos. M. Mashinostroenie, 1986. 480 s. [in Russian]
4. Strichkovo-kolodkovi galma. E.I. Kryzhanivsky, M.O. Volchenko, D.O. Volchenko et al. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG. Volume 2. 2007. 215s. [in Ukrainian]
5. Chichinadze A.B., Brown E.D., Ginzburg A.G., Ignatiev Z.V. Raschet, ispitaniye i podbor frictionnikh par. M. Nauka, 1989. 267 s. [in Russian]