



УДК 539.621

СЕМЕРАК В. М., канд. техн. наук, доцент, Львівський національний аграрний університет

КОСАРЧИН В. І., канд.фіз.-мат. наук, доцент, Львівський національний аграрний університет

ІВАНІК Є. Г., канд.фіз.-мат. наук, ст. наук. співр., доцент, Національний транспортний університет, навчально-консультаційний центр у м. Львові

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХНКУ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ТЕРМОЧУТЛИВОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ

На основі розв'язку нелінійної нестационарної теплової задачі тертя з урахуванням експоненціальної залежності коефіцієнта тертя від температури проведено числовий розрахунок зміни швидкості ковзання, температури та зношування на робочій поверхні для серійної пари фрикційних елементів гальмівних систем чавун ЧНМХ -металокераміка ФМК-11.

Basing on the solution of the transient frictional heating problem with taking into account of an exponential dependence of a friction coefficient on a temperature the numerical calculation of the sliding speed, temperature and wear changing on a working surface is obtained for the serial couple of frictional elements of a braking systems: iron – metal-ceramics.

Постановка проблеми. Теплові процеси, що відбуваються в рухомих ланках і вузлах машин, пов'язані з їх технічним станом і умовами експлуатації. До найбільш поширених вузлів нестационарного тертя відносяться гальма. Гальмівні фрикційні системи використовуються до гасіння кінетичної енергії обертального або поступального руху мас за допомогою сил тертя. Гальмо повинно забезпечувати: а) зупинку машини або вузла на заданому шляху чи його відрізка у всьому діапазоні експлуатаційних навантажень і швидкостей; б) необхідну довговічність роботи в межах не менше заданого ресурса. Робочі характеристики гальм: величина і стабільність гальмівного момента, зміна швидкості і температурного режиму, тощо, повинні відповідати вимогам, що впливають із умов експлуатації вузла тертя. При гальмуванні швидкість відносного ковзання може бути зведена до нуля (зупинка) або знижена до заданої

величини (пригальмовування). Під час роботи гальмівних вузлів змінюються всі параметри процесу: швидкість, навантаження, температура, фізико-механічні і фрикційно-зношувальні властивості матеріалів пари, умови контактування. Інтенсивність цих процесів в значній мірі визначається температурою фрикційного контакту[1–9].

Тепловий нагрів під час гальмування має вирішальний вплив на фізико-механічні і фрикційно-зношувальні властивості матеріалів та визначає межі їх застосування [10–13].

Конструкційні заходи по запобіганню схоплюванню, заїданню і задиру в тяжконавантажених вузлах тертя сучасних машин ефективні лише за достовірної оцінки температур, які розвиваються в області співдотику тіл, що труться. Існуючі експериментальні методи не дають змоги точно визначити температуру на ділянці контакту пар тертя при складних теплових режимах обробки.

Тому, відомі в науковій літературі експериментальні дані можна ввіжати за наближені і використовувати лише для попередніх оцінок [10–14].

Аналіз досліджень і публікацій з даної проблематики. Математичний опис процесу гальмування за допомогою системи рівнянь теплової динаміки тертя (ТДТ) запропоновано у праці [10]. Система рівнянь ТДТ складається з розв'язку теплової задачі тертя під час гальмування, закону зміни в часі навантаження (силового і теплового), рівняння руху, а також емпіричних залежностей від контактної температури коефіцієнта тертя і твердості матеріалів, що складають фрикційну пару. Тепловіддачею в процесі гальмування нехтувалось.

На основі системи рівнянь ТДТ розроблена методика теплового розрахунку гальм на етапі проектування [13]. За допомогою цієї методики проведено розрахунки теплових режимів гальмівних систем різних типів: дискових, колодочних, камерних. Порівняння з даними експерименту показало добре їх співпадіння [14].

Гальмування представляє собою специфічний нестационарний процес тертя, при якому всі параметри взаємозв'язані, а їх зміни взаємозумовлені. Зокрема, такий зв'язок є між фрикційним тепловиділенням та зносом робочих поверхонь тіл, що труться. Для довготривалих процесів гальмування, що супроводжуються значним тепловиділенням і високими температурами на контакті, вирішальний вплив на інтенсивність зношування має температура [15–18].

Аналіз результатів, відображених в огляді, можуть бути в тій чи іншій мірі використані для практичної оцінки теплового режиму накладок гальмівних систем. Зрозуміло також, що проаналізовані тут методики та підходи дослідження напруженого стану та температурних режимів фрикційних елементів гальм – лише один із кроків до створення надійних методів теплового

розрахунку гальм. Тому представляє інтерес розповсюдити викладені підходи в напрямку постановки та розв'язку відповідної нелінійної задачі тертя для накладки із температурозалежними теплофізичними властивостями (термочутливі системи).

Постановка завдання. Подамо методику теплового розрахунку вузлів тертя гальмівних систем, що базується на розв'язку нестационарної задачі теплопровідності для двох напівбезмежних тіл без будь-яких обмежень на інтенсивність фрикційного теплового потоку. Розглянуто два елементи, які моделюємо півбезпечними тілами, що стискаються нормальним розподіленим навантаженням. Верхній півпростір (тіло 1) ковзає по нижньому (тіло 2) вздовж осі у декартової системи координат x, z з початком на поверхні розділу матеріалів. Внаслідок дії сил тертя на поверхні контакту $z = 0$ відбувається гальмування тіла 1, яке супроводжується теплоутворенням та зношуванням робочих поверхонь.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для визначення швидкості ковзання V , температури T та величини зношування I в довільний момент часу $0 \leq t \leq t_s$ (t_s – час зупинки) сформулюємо теплову задачу тертя

$$M \frac{d}{dt} V(t) = -F, \quad 0 \leq t \leq t_s, \quad (1)$$

$$p(t) = p_0 [1 - \exp(-t/t_m)] [1 + B_1 \sin(B_2 t/t_m)], \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} T_n(z, t) = \frac{1}{k_n} \frac{\partial}{\partial t} T_n(z, t), \quad 0 \leq t \leq t_s, \quad z > 0 \text{ для } n=1, \quad z < 0 \text{ для } n=2, \quad (3)$$

$$K_2 \frac{\partial}{\partial z} T_2(0, t) - K_1 \frac{\partial}{\partial z} T_1(0, t) = q(t), \quad (4)$$

$$T_1(0, t) = T_2(0, t), \quad 0 \leq t \leq t_s, \quad (5)$$

$$T_n(z, 0) = 0, \quad z > 0 \text{ для } n=1, \quad z < 0 \text{ для } n=2,$$

де у рівняннях та співвідношеннях (1)–(6) позначено: $F = f(T)p(t)$ – сила тертя на одиницю площі, M – маса, віднесена до

одиниці площі, t_m – параметр, що характеризує тривалість збільшення навантаження від нуля до максимального значення p_0 , B_1 – амплітуда коливаль, B_2 – частота коливаль притискувальної сили. Інтенсивність фрикційного теплового потоку на поверхні розділу матеріалів дорівнює питомій потужності сил тертя:

$$q(t) = f(T) V(t) p(t), \quad 0 \leq t \leq t_s, \quad (7)$$

а залежність коефіцієнта тертя від температури для трибосистеми фрикційна металокераміка ФМК-11 – чавун ЧХМХ має вигляд

$$f(T) = f_0 f^*(T), \quad f^*(T) = \exp(-\lambda T), \quad (8)$$

де f_0, λ – коефіцієнти, які визначаються експериментально.

Приймаємо абразивний закон зношування [14]

$$I(t) = \int_0^t m(T) q(t') dt', \quad 0 \leq t \leq t_s, \quad (9)$$

де $I(t) = I_1(t) + I_2(t)$, $I_n(t)$ – переміщення робочих поверхонь тіл вздовж осі z внаслідок зношування, $m(T) = m_0 m^*(T)$ – коефіцієнт зношування,

$$m^*(T) = d_0 + d_1 T(t) + \frac{d_2}{\{d_3 [T(t) - T_1^w]\}^2 + 1} + \frac{d_4}{\{d_5 (T(t) - T_2^w)\}^2 + 1}, \quad (10)$$

T_n^w ($n = 1, 2$); d_j ($j = 0, 1, 2, \dots, 5$) – коефіцієнти, що визначаються експериментально [10–13].

Застосувавши до системи диференціальних рівнянь та крайових умов (1)–(6) інтегральне перетворення Лапласа по часу t із урахуванням залежностей (7)–(10), отримали систему нелінійних інтегральних рівнянь, розв'язок якої знаходився методом послідовних наближень [19]. На основі розробленого алгоритму проведено розрахунок контактних характеристик гальма для серійної пари тертя чавун ЧХМХ – металокераміка ФМК-11. Деякі з одержаних результатів представлено на рис. 1, 2. Суцільні криві на цих рисунках

відображають результати, одержані з постійним коефіцієнтом тертя ($B_1 = 0.2, \lambda = 0$), а штрихові криві – загальний випадок залежності коефіцієнта тертя від температури за формулою (8) $B_1 = 0.2, \lambda = 1.5 \cdot 10^{-3}$.

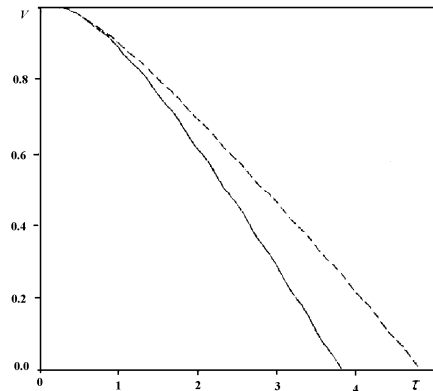


Рис. 1. Залежність безрозмірної швидкості $V^* = V/V_0$ від безрозмірного часу $\tau = t/t_m$

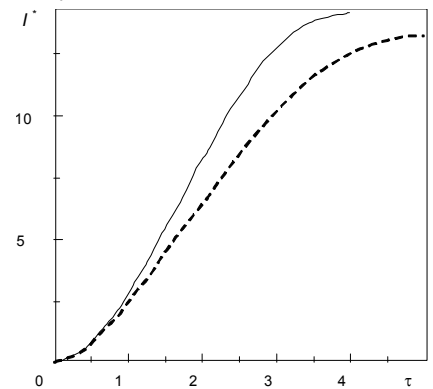


Рис. 2. Залежність безрозмірного зношування $I^* = I/I_0$ від безрозмірного часу $\tau = t/t_m$

Висновки. Отримані результати придатні для практичного застосування при тепловому розрахунку окремих фрикційних елементів; при розробці методів випробування матеріалів на фрикційну теплостійкість; при проектуванні й конструюванні фрикційних елементів гальмівних систем; для вироблення рекомендацій по запобіганню заїданню та схоплюванню у фрикційних вузлах машин.

Наукова новизна результатів полягає в постановці та числово-аналітичному розв'язуванні нелінійних теплових задач тертя з урахуванням залежності коефіцієнтів тертя та

зношування від температури (фрикційне теплоутворення під час гальмування).

Література

1. Александров М. П. Тормозные устройства в машиностроении / М. П. Александров. – М.: Машиностроение, 1965. – 676 с.
2. Александров В. М. Контактная задача термоупругости с учетом износа и тепловыделения от трения / В. М. Александров, Г. К. Аннакулова // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 1. – С.24–28.
3. Александров В. М. Методы решения контактных задач термоупругости с учетом износа взаимодействующих поверхностей / В. М. Александров, Е. В. Коваленко // Прикл. механика и техн. физика. – 1985. – № 3. – С.129–131.
4. Александров М. П. Расчёт нагрева тормозных устройств с малым коэффициентом взаимного перекрытия (на примере дисково-колодочных тормозов подъемно-транспортных машин) / М. П. Александров, А. Л. Носко //Трение и износ. – 1993. – Т.14, № 5. – С.895-901.
5. Балакин В. А. Испытания материалов на фрикционную теплостойкость / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко //Трение и износ. – 1996. – Т. 17, №2. – С.194-201.
6. Балакин В. А. Тепловые процессы, возникающие при включении фрикционных муфт и тормозов / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, О. Ю. Комков //Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 5. – С.589–597.
7. Балакин В. А. Теплоперенос в зоне фрикционного контакта при включении дисковых муфт сцепления и тормозов / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, О. Ю. Комков //Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 4. – С.450-455.
8. Богданович П. Н., Белов В. М. Тепловые процессы в зоне контакта трущихся тел / П. Н. Богданович, В. М. Белов //Трение и износ. – 1992. – Т.13, № 4. – С.624-632.
9. Бухарин Н. А. Автомобили / Н. А. Бухарин, В. С. Прозоров, М. М. Щукин. – М. : Машиностроение, 1965. – 484 с.
10. Гинзбург А. Г. Теоретические и экспериментальные основы расчета однократного процесса торможения с помощью системы уравнений тепловой динамики трения / А. Г. Гинзбург // В сб.: Оптимальное использование фрикционных материалов в узлах трения машин. – М. : Наука. - 1973. - С.93-105.
11. Гинзбург А. Г. Расчет температурного режима дискового железнодорожного тормоза / А. Г. Гинзбург, А. М. Ромашко, В. Ф. Титаренко // Расчет и моделирование режима работы тормозных и фрикционных устройств. – М. : Наука. – 1978. – С.21–25.
12. Гинзбург А. Г. Применение уравнений тепловой динамики трения для расчета рабочих характеристик тормозов / А. Г. Гинзбург, А. В. Чичинадзе // Тепловая динамика трения. – М. : Наука. – 1970. – С.7–17.
13. Гинзбург А. Г. К расчету износа при торможении с применением системы уравнений тепловой динамики трения / А. Г. Гинзбург, А. В. Чичинадзе //Трение и износ фрикционных материалов. – М.: Наука. – 1977. – С.26–30.
14. Дроздов Ю. Н. Противозадирная стойкость трущихся тел / Ю. Н. Дроздов. – М. : Наука, 1981. – 140 с.
15. Евтушенко А. А. Влияние износа на температуру трущейся поверхности накладки дискового

- тормоза / А. А. Евтушенко, Е. Г. Иваник //Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 4. – С.653–666.
16. Евтушенко А. А. Оценка контактной температуры и износа фрикционной накладки при торможении / А. А. Евтушенко, Е. Г. Иваник // Инж.-физ. журн. – 1999. – Т. 72, № 5. – С.988–994.
17. Чичинадзе А. В. Расчёт и исследования внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. – М. : Наука, 1967. – 231 с.
18. Чичинадзе А. В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар / А. В. Чичинадзе А. В., Э. Д. Браун, А. Г. Гинзбург, З. В. Игнатъева. – М. : Наука, 1979. – 267 с.
19. Верлань В. Ф. Интегральные уравнения: Методы, алгоритмы, программы / В.Ф. Верлань, В.С. Сизиков. – К. : Наук. думка, 1986. – 543 с.