

ТЕМПЕРАТУРА НА ПЛЯМАХ ФАКТИЧНОГО КОНТАКТУ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ

*В. Семерак, к. т. н, І. Ніщенко, к. ф.-м. н, О. Пономаренко, к. ф.-м. н.
Львівський національний аграрний університет*

Постановка проблеми. Експериментальні роботи з вивчення теплових процесів на ділянках контакту при ковзанні твердих тіл показують, що джерелом фрикційної теплової енергії слугують малі області біля вершин мікровиступів спряжених поверхонь. Механічна енергія, яка йде на тертя твердих тіл, трансформується в теплову і локалізується на плямах фактичного контакту, відомих у літературі під назвою «гарячих плям» (ГП). Сумарна площа ГП не перевищує 1% номінальної площі контакту. Ці розігріті до високих температур плями витягнуті в напрямі ковзання і мають форму, близьку до еліптичної. Зі зростанням мікротвердості металу (Al-Cu-Ti) чи зменшенням швидкості ковзання форма плям з витягнутої прямої до округлої із середнім діаметром 34-41 мкм. Час існування ГП залежно від їх розміру складає від мілісекунд до декількох секунд [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз запису кінетики процесів тепловиділення на ділянці контакту показав, що окрема ГП протягом періоду свого існування переміщується вздовж лінії відносного ковзання співдотичних тіл. Середня швидкість її руху для пари тертя сапфір-мідь складає 930 мкм/с, а для пари сапфір-сталь – 360 мкм/с [2].

Висока концентрація теплової енергії на скінченній кількості ГП і подальша інтенсифікація фізико-хімічних і механічних процесів призводять до руйнування тіл, що труться. Тому температури на поверхнях пар тертя досліджувалися в багатьох теоретичних роботах, які становлять сьогодні окремий науковий напрям – теплові задачі тертя. Огляди виконаних досліджень наведені в роботах [3]. В основному вивчені стаціонарні розподіли температури як з урахуванням, так і без врахування конвективного охолодження на поверхні тіла [4]. Спробу повного (від розігріву до повного охолодження) опису теплових процесів на одиничному мікровиступі поверхні в межах номінальної площі контакту вперше здійснено в роботі [5]. Тут знайдено осесиметричний нестационарний розподіл температури поблизу нерухомого кругового джерела тепла малого радіуса на поверхні напівнескінченного тіла (основна задача). Представлено також розв'язок допоміжної задачі про чисто конвективне охолодження тіла під час відсутності джерела тепла. Значення інтенсивності теплового потоку в основній задачі передбачалося постійним, пропорційним середньому контактному тиску Герца. У роботі [6] запропоновано підхід до опису теплових процесів на окремому мікровиступі поверхні при змінному (залежному від просторових координат) розподілі інтенсивності потоку тепла.

Постановка завдання. Мета досліджень – побудувати алгоритм розрахунку перехідних процесів місцевого підвищення температури на поверхні

тертя при рівномірному русі по ній кругової ГП.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо джерело тепла у формі кола $r^2 = x^2 + y^2 \leq a^2$, яке рухається з постійною швидкістю V уздовж осі x на поверхні $z = 0$ напівнескінченного твердого тіла. Передбачається, що початок O системи координат xuz розташовано в центрі цього кола; питома потужність джерела постійна і дорівнює $q = \eta f V p_0$; зовні джерела при $r > a$ гранична поверхня тіла теплоізолювана. Середній фактичний тиск p_0 визначається як відношення навантаження P до фактичної площі контакту $A_r = \pi a^2$. Знайдемо розподіл температури.

Для визначення нестационарного температурного поля в півпросторі $z \geq 0$ маємо рівняння теплопровідності [7]:

$$\nabla^2 T + \frac{V}{k} \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

яке підстановкою

$$T = T_* \theta^{\frac{Vx}{2k}} \quad (2)$$

приводять до вигляду

$$\nabla^2 T_* - \left(\frac{V}{2k} \right)^2 T_* = \frac{1}{k} \frac{\partial T_*}{\partial t}. \quad (3)$$

Перейшовши до циліндричної системи координат (r, φ, z) і поклавши $\rho = r/a$, $\zeta = z/a$, перепишемо рівняння (3) у вигляді

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] T_* - Pe T_* = \frac{a^2}{k} \cdot \frac{\partial T_*}{\partial t}. \quad (4)$$

Тоді математичну модель процесу локального підвищення температури в зоні ГП сформулюємо як крайову задачу для диференціального рівняння теплопровідності (4) у вигляді

$$\frac{\partial T_*}{\partial \zeta} = \begin{cases} -\Lambda \cdot e^{Pe \cdot \rho \cdot \cos \phi}, & \rho \leq 1, \zeta = 0 \\ 0, & \rho > 1, \zeta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$T_*(\rho, \phi, \rho, \zeta, t) = (\rho, \phi + 2\pi, \zeta, t) \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial T_*}{\partial \zeta} \right|_{\varphi=0} = \left. \frac{\partial T_*}{\partial \zeta} \right|_{\varphi=\pi}. \quad (7)$$

$$|T_*(\rho, \phi, \rho, \zeta, t)| < \infty, \quad T_*(\rho, \phi, \zeta, 0) = 0. \quad (8)$$

Тут позначено

$$\Lambda = \frac{q \cdot a}{K} = \frac{fVP}{\pi aK}. \quad (9)$$

Послідовно застосовуючи до рівняння (4), з урахуванням умов (6)-(8), скінченне косинус-перетворення Фур'є за змінною ϕ , інтегральні перетворення Ганкеля за радіальною координатою ρ і Лапласа за часом t одержуємо:

$$T(\rho, \phi, \zeta, t) = e^{-Pe \cdot \rho \cdot \cos \phi} T_*(\rho, \phi, \zeta, t), \quad (10)$$

$$T_*(\rho, \phi, \zeta, t) = 2\Lambda \sum_{n=0}^{\infty} \cos(n\phi) \int_0^{\infty} \xi \phi_n(\xi, Pe) \Phi(\xi, \zeta, Fo, Pe) J_n(\xi\rho) d\xi. \quad (11)$$

$$2\Phi(\xi, \zeta, Fo, Pe) = e^{-\zeta\sqrt{\xi^2+Pe^2}} \operatorname{erfc}\left[\frac{\zeta}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{Fo(\xi^2+Pe^2)}\right] - e^{\zeta\sqrt{\xi^2+Pe^2}} \operatorname{erfc}\left[\frac{\zeta}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{Fo(\xi^2+Pe^2)}\right]. \quad (12)$$

де $F_0 = \frac{kt}{a^2}$ – критерій Фур'є.

Висновки. Проведені дослідження показали, що:

- найбільший вплив ГП на температуру і її градієнти спостерігається на поверхні тертя поблизу області нагрівання ($0 \leq \rho \leq 1,5$);
- всередині ГП і перед нею збільшення швидкості руху теплового джерела призводить до зниження температури і збільшення її градієнтів. В області, розташованій за джерелом, швидкість руху ГП практично не впливає на розподіл температури;
- зі збільшенням швидкості руху ГП тривалість перехідного процесу зменшується;
- після припинення фрикційного нагрівання, найбільш різко охолоджується зона всередині ГП ($0 \leq \rho \leq 1$). Перехідний процес від стаціонарного стану до повного охолодження тут найкоротший;
- найбільший вплив ГП на температуру і її градієнти спостерігається на поверхні тертя поблизу області нагрівання ($0 \leq \rho \leq 1,5$).

Бібліографічний список

1. Гриліцький Д. В. Дослідження термомеханічних процесів під час шліфування / Д. В. Гриліцький, О. О. Євтушенко, В. Й. Паук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. – 31, № 2. – С. 14–21.

2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 509 с.
3. Евтушенко А. А. Тепловые процессы, возникающие при холодной прокатке металлов / А. А.Евтушенко, Е. А. Евтушенко // Трение и износ. – 1998. – 20, № 2. – С. 125–131.
4. Коровчинский М. В. Основы теории термического контакта при локальном трении / М. В. Коровчинский // Вопросы трения, проблемы смазки. – М. : Наука, 1966. – Ч. 1. – С. 98–145.
5. Марчук Г. И. Введение в проекционно-сеточные методы / Г. И. Марчук, В. И. Агошков – М. : Наука, 1981. – 416 с.
6. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление нагревом поверхности / В. А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.
7. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар / [Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Гинзбург А. Г. и др.]. – М. : Наука, 1979. – 268 с.

Семерак В., Нищенко І., Пономаренко О. Температура на плямах фактичного контакту при гальмуванні

Отримано просторовий розподіл нестационарного температурного поля в напівнескінченному тілі, зумовлений дією поверхневого теплового фрикційного джерела, зосередженого в коловій області поверхні. Подано алгоритм розрахунку перехідних теплових процесів.

Ключові слова: температура, півпростір, контактний тиск, гальмування, час, тертя, поверхня.

Semerak V., Nischnko I., Ponomarenko O. Temperature local concentrated heat zone by moving frictional

The distribution of the three-dimensional transient temperature field in a half-space that is heated in a circular surface area by moving frictional heating flow is studied. The transient temperature processes during either heating or cooling of the solid are investigated. It is shown that basing on the obtained solution the «hot spot» arising and moving (kinetics) on the surfaces of a hardly loaded frictional contacts can be studied. The solution of the quasistatic frictional heating problem for the half-space with a protecting coating is obtained.

Key words: temperature, semi-space, contact pressure, braking, time, frictional, surface.

Семерак В., Нищенко И., Пономаренко О. Температура на пятнах фактического контакта при торможении

Получено пространственное распределение нестационарного температурного поля в полуограниченном теле, обусловленное действием поверхностного теплового фрикционного источника, сосредоточенного в круговой области поверхности. Дан алгоритм расчета переходных процессов.

Ключевые слова: температура, полупространство, контактное давление, торможение, время, трение, поверхность.