

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ  
ІМ. Я. С. ПІДСТРИГАЧА

---

На правах рукопису

УХАНСЬКА  
Оксана Михайлівна

КВАЗІСТАТИЧНІ КОНТАКТНІ ЗАДАЧІ  
ТЕРМОПРУЖНОСТІ ІЗ УРАХУВАННЯМ  
ТЕПЛОУТВОРЕННЯ ВІД ДІЇ СИЛ ТЕРТЯ

(01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла)

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Л ь в і в — 1994

Робота виконана на кафедрі механіки Львівського держуніверситету ім. І.Франка.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук  
старший науковий співробітник  
Євтушенко О.О.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук  
професор Мартиненко М.А.,  
кандидат фізико-математичних наук  
старший науковий співробітник Швець Р.М.

Провідна організація - Фізико-механічний інститут НАН України ім. Г.В.Карпенка.

Захист дисертації відбудеться "28" листопада 1994 р.  
о 15 год. на засіданні спеціалізованої ради К 016.53.01 по  
присудженню наукового ступеня кандидата фізико-математичних і  
кандидата технічних наук при Інституті прикладних проблем  
механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України за адресою:  
290053, м.Львів, вул. Наукова, 3-б.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі ІППММ (м.Львів,  
вул. Наукова, 3-б).

Відгук на автореферат просимо надсилати за адресою: 290053,  
м.Львів, вул. Наукова, 3-б, ІППММ, вченому секретарю спеціалізо-  
ваної ради.

Автореферат розіслано "27" новимля 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради  
кандидат фізико-математичних наук

Шевчук П.Р.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00777149 (Z)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Надійність та довговічність сучасних машин та механізмів безпосередньо залежить від тертя та зношування їх вузлів та елементів. Особливо гостро питання зовнішнього тертя постають при проектуванні та розрахунку транспортних, дорожньо-будівельних, підйомних та бурових машин, станочного та прокатного обладнання. Труднощі виникають внаслідок того, що в вузлах сухого тертя зношування, теплоутворення, пружне та температурне деформування є складними, взаємозалежними процесами. При цьому вирішальний вплив на характер тертя та зношування має температура в зоні контакту. Аналітичне визначення температури контакту ковзання є комплексною проблемою, що складається із самостійних задач, до числа яких, окрім аналізу і дослідження виділення і розсіювання тепла на фрикційному контакті, входять задачі контактної взаємодії елементів пари тертя. Побудова розв'язків таких задач є однією з найактуальніших проблем сучасної теорії тертя, оскільки дозволяє визначати розміри та розташування зон фактичного контакту, вивчити кінематику зміни властивостей матеріалів, що труться, і, врешті, виробити рекомендації по оптимальному підбору матеріалів пари тертя. Фундаментальні результати в постановці та розробці методів дослідження контактних задач із врахуванням тертя, теплоутворення та зношування одержані в роботах В.Л.Абрамяна, В.М.Александрова, О.Є.Андрейківа, Н.Х.Арутюняна, В.О.Бабешко, Ю.І.Бабєя, М.Н.Бородачова, А.В.Воровича, Л.О.Галіна, М.В.Генералова, І.Г.Горячевої, Д.В.Грилицького, А.М.Гузя, Ю.М.Дроздова, Я.М.Кізіми, Є.В.Коваленка, М.В.Коровчинського, Є.А.Кузнецова, М.А.Мартиненка, М.Д.Мартиненка, С.М.Мхітаряна, В.І.Моссаковського, В.В.Панасюка, Г.Я.Попова, А.К.Пріварнікова, В.С.Проценко, В.Л.Рвачова, В.В.Рудницького, М.Й.Теплого, А.Ф.Улітка, Я.С.Уфлянда, М.В.Чернеця, Р.М.Швеця, І.Я.Штраєрмана, J.Barber, R.Burton, M.Comminou, H.Conway, J.Dundurs, F.Erdogan, C.M.L.Gladwell, D.Hills, J.Keer, S.Krenk, E.Melan, Z.Olesiak, H.Poritsky, I.Sneddon, P.Theocaris, S.Timoshenko, J.Willis та інших авторів. У роботах Д.В.Грилицького та представників очолюваної ним наукової школи - О.О.Свтушенка, Р.Д.Кульчицького-Жигайла, В.П.Левицького, Б.С.Окрепкого, В.К.Опанасовича,

В.Я.Паука, В.М.Онишкевича досліджувались контактні задачі термопружності із одночасним впливом теплоутворення, зношування та шорсткості поверхонь. Розглядався, в основному, ustalений режим фрикційного тепловиділення на контактї. Розв'язки відповідних контактних задач для квазістационарного та нестационарного теплоутворення (наприклад, робота фрикційних пар під час гальмування) вивчені недостатньо.

Метою дисертаційної роботи є дослідження впливу на основні зношувально-контактні характеристики квазістационарного та нестационарного теплоутворення під час фрикційної взаємодії пружних тіл.

Наукова новизна роботи полягає у:

1. Застосуванні методу контурного інтегрування при розв'язуванні плоскої задачі термопружності для півпростору, по поверхні якого рівномірно рухається теплове джерело тепла. Знаходженні на цій основі повного поля напружень та переміщень у півпросторі у вигляді комбінацій функцій Ганкеля першого роду. Порівнянні отриманого розв'язку з відомими результатами, знайденими методом усереднених інтегральних характеристик.
2. Побудові та чисельно-аналітичному розв'язанні системи сингулярних інтегральних рівнянь плоскої контактної задачі термопружності для півпростору при неідеальному тепловому контактї і квазістационарному теплоутворенні в області співдотику тіл. Встановленні існування граничного значення  $\sigma_{cr}$  (при необмеженому зростанні притисокаючої сили) радіуса ділянки контакту. Дослідженні впливу механічних та теплофізичних параметрів задачі на величину  $\sigma_{cr}$ .
3. Побудові розв'язку осесиметричної квазістатичної задачі термопружності для півпростору, що нагрівається в круговій області джерелом тепла з інтенсивністю, пропорційною контактному тиску відповідної ізотермічної контактної задачі. Дослідженні перехідних температурних процесів задачі та аналізі впливу температурних напружень на загальний рівень напружень у деформівному тілі.
4. Розробці термомеханічного критерію зношування під час фрикційного контактування пружних тіл.

Практична цінність роботи. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетної теми кафедри механіки Львівського держуніверситету "Моделювання, методи досліджень і програмне забезпечен-

ня контактних задач в трибології", № державної реєстрації - 0193V041407, шифр теми - Мх 564Б.

За допомогою запропонованого в дисертаційній роботі термомеханічного критерію зношування будується карта зношування, яка може бути ефективно використана конструкторами при розрахунку переходу до зношування як деяких марок сталей, так і керамічних матеріалів.

Вірогідність отриманих результатів забезпечується: строгою постановкою задач, чітким і послідовним застосуванням математичних методів при їх розв'язанні; узгодженням результатів для деяких частинних і граничних випадків з відомими в літературі розв'язками; узгодженням між собою результатів, отриманих в окремих розділах роботи; підтвердженням деяких теоретичних положень числовими методами та відомими експериментальними даними.

Апробація роботи. Основні результати досліджень, отримані в дисертаційній роботі, доповідалися на III Всесоюзній конференції по механіці неоднорідних структур (Львів, 1991 р.), на науковому симпозиумі "Современные проблемы механики контактных взаимодействий" (Єреван, 1992 р.); на I Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (Львів, 1993 р.), на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Львівського держуніверситету ім.І.Франка (1989- 1994 рр.), на науковому семінарі Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України (1994 р.), на спеціалізованому кваліфікаційному семінарі по механіці деформівного твердого тіла в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України (1994 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано чотирнадцять наукових праць.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох глав, висновків, списку літератури і викладена на 158 сторінках машинописного тексту. Робота містить 43 рисунки і список використаної літератури вітчизняних і закордонних авторів із 101 найменуванням.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано важливість і актуальність питань, розв'язуванню яких присвячена дисертація, вказана мета роботи і

сформульовано основні положення, які виносяться на захист. Також наведено огляд робіт задач термопружності для рухомих джерел тепла та контактних задач із урахуванням теплоутворення від дії сил тертя та зношування поверхонь.

Перша глава носить допоміжний характер. Тут в стислій формі наведено вихідні рівняння і основні співвідношення, необхідні для постановки та розв'язування контактних задач термопружності із урахуванням квазістационарного та нестационарного фрикційного теплоутворення.

В другій главі досліджено плоскі квазістатичні задачі термопружності для півпростору  $y \geq 0$ ,  $|x| < \infty$  (плюска деформація), що нагрівається на поверхні  $y=0$  рухомими в напрямку осі  $x$  лінійними зосередженими та розподіленими джерелами тепла. В § 2.1 знайдено розв'язок диференціального рівняння теплопровідності граничної задачі

$$\Delta T(x, y) + \frac{V}{k} \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

( $T$  - температура,  $V$  - швидкість руху джерела тепла,  $k$  - коефіцієнт температуропровідності,  $\Delta$  - оператор Лапласа) при умовах на межі

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - hT = Q \delta(x), \quad y=0, \quad |x| < \infty, \quad (2)$$

$$T, T_x, T_y \rightarrow 0, \quad \text{коли } r = (x^2 + y^2)^{1/2} \rightarrow \infty, \quad (3)$$

( $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $h$  - коефіцієнт теплообміну,  $Q$  - густина теплового потоку). Застосуванням комплексного прямого перетворення Фур'є по змінній  $x$  та використанням методу контурного інтегрування при переході до простору оригіналів розв'язок граничної задачі (1)-(3) отримано у вигляді

$$T(x, y) = \frac{Q}{\pi \lambda} \exp(-s_0 y) \cdot \int_0^{\infty} \frac{R(x, y, s) \cdot e^{-s} ds}{\sqrt{s^2 + (2s_0 - Vx/(2k))s}}, \quad (4)$$

де

$$s_0 = \frac{V(x+r)}{2k}, \quad R(x, y, s) = \frac{s^2 + a_1 s + b_1}{s^2 + a_2 s + b_2}, \quad r = (x^2 + y^2)^{1/2},$$

$$a_1 = \frac{Vr}{k} + \frac{h}{\lambda} y, \quad b_1 = \left( \frac{Vy}{2k} \right)^2 + \frac{Vh}{k\lambda} r y,$$

$$a_1 = \frac{Vr}{k} + 2 \frac{h}{\lambda} y, \quad b_1 = \left( \frac{Vy}{2k} \right)^2 + \frac{Vh}{k\lambda} r y + \left( \frac{Vh}{k\lambda} r \right)^2.$$

Побудовано також розв'язок відповідної квазістатичної граничної задачі термопружності для системи рівнянь Ляме

$$(1-2\nu)\Delta u_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 2\alpha_T(1+\nu) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

$$(1-2\nu)\Delta u_y + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 2\alpha_T(1+\nu) \frac{\partial T}{\partial y},$$

при умовах на межі

$$\sigma_y = \sigma_{xy} = 0, \quad y=0, \quad |x| < \infty \quad (6)$$

В результаті знайдено поля напружень та переміщень у півпросторі.

Досліджено часткові випадки значень теплофізичних параметрів задачі, зокрема, коли поверхня півпростору є теплоізолюваною ( $h=0$ ). Показано, що поля термічних напружень та переміщень у півпросторі мають вигляд комбінації функцій Ганкеля першого роду. Числові результати наведено для температури та нормальних переміщень межі  $y=0$  півпростору в залежності від швидкості руху  $V$  та коефіцієнта тепловіддачі  $h$ .

На основі фундаментального розв'язку (4) в § 2.2 методом компенсацій знайдено точний розв'язок змішаної задачі теплопровідності для рівняння (1) при умовах на межі

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \begin{cases} Q, & |x| \leq l, \\ hT, & |x| > l, \end{cases} \quad y=0, \quad (7)$$

Встановлено, що теплообмін незначно впливає на розподіл температури під джерелом (зниження максимальної поверхневої темпера-

тури, розрахованої для значень числа Пекле  $Pe=Vl/k=1$  та критерію Біо  $Bi=hl/k=1$  не перевищує 5% порівняно з випадком теплоізолюваної поверхні ( $Bi=0$ ).

Наближений розв'язок квазістаціонарної задачі теплопровідності (1), (7) та відповідної квазістатичної задачі термопружності (5), (7) за допомогою методу усереднених інтегральних характеристик отримано в § 2.3. Зважаючи на незначну (не більше 3%) різницю в результатах під час знаходження максимальних поверхневих температур точним (§ 2.2) та наближеним (§2.3) методами, зроблено висновок про доцільність використання останнього при розв'язуванні задач такого класу.

Третя глава присвячена плоскій контактній задачі термопружності для півпростору із урахуванням квазістаціонарного теплоутворення. Розглядається контакт під дією притискаючої сили  $P$  двох пружних тіл, одне з яких (штамп) ковзає по поверхні іншого (півпростір) з постійною швидкістю  $V$ . Взаємодія тіл супроводжується на ділянці контакту теплоутворенням, інтенсивність якого рівна потужності сил тертя. Тепловий контакт між тілами неідеальний. Поза ділянкою контакту вільні поверхні тіл теплоізолювані (допустимість цього припущення робиться на підставі аналізу результатів другого розділу). Визначаються величина ділянки контакту  $(a,b)$ , розподіл контактного тиску  $p(x)$ , температур  $T_i(x)$ , теплових потоків  $q_i(x)$  в тілах. Індeksi  $i=1,2$  тут та надалі характеризують величини, що відносяться до штампа ( $i=1$ ) та півпростору ( $i=2$ ). Тіла віднесено до ейлерової системи декартових координат  $xOy$ , жорстко зв'язаної з рухомих тілом. Задача зведена до розв'язування диференціальних рівнянь теплопровідності (1) для  $V=0$  (штамп) та  $V=0$  (півпростір) і рівнянь термопружності Ляме (5) при відомих механічних і таких теплофізичних умовах

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = fVp(x), \quad x \in (a,b), \quad y=0, \quad (8)$$

$$h_0 \left[ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right] + T_2(x) - T_1(x) = 0, \quad x \in (a,b), \quad y=0, \quad (9)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \quad \epsilon = 1, 2, \quad x \in (a, b), \quad y = 0 \quad (10)$$

Тут  $f$  - коефіцієнт тертя,  $h_0$  - контактний термоопір. Задовольняючи вказані механічні та теплофізичні граничні умови (8)-(10), задачу зведено до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь (С.І.Р.) з особливим ядром типу Коші відносно безрозмірних тиску  $p^*(\xi)$  та теплового потоку  $q^*(\xi)$

$$f \Gamma p^*(\xi) + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{p^*(r) dr}{r-\xi} + \Gamma PeH \int_{-1}^1 p^*(r) \left[ \frac{\delta_1}{2\delta_2} \varepsilon \operatorname{erfc}(\xi-r) - N(\xi-r) \right] dr + \Gamma PeH \int_{-1}^1 q^*(r) \left[ \frac{\delta_1}{2\delta_2} \varepsilon \operatorname{erfc}(\xi-r) + N(\xi-r) \right] dr = G_0(\xi), \quad |\xi| \leq 1, \quad (11)$$

$$-\varepsilon \rho^* (\xi) + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 p^*(r) \left[ -\frac{1}{\xi-r} + Pe \frac{\lambda_1}{\lambda_2} M(\xi-r) \right] dr + \quad (12)$$

$$+ \varepsilon \cdot q^*(\xi) + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 q^*(r) \left[ -\frac{1}{\xi-r} - Pe \frac{\lambda_1}{\lambda_2} M(\xi-r) \right] dr = 0, \quad |\xi| \leq 1,$$

де

$$p^*(\xi) = \frac{a_0 p(a_0 r + b_0)}{p}, \quad q^*(\xi) = \frac{a_0}{\Gamma V P} q(a_0 r + b_0), \quad a_0 = \frac{b-a}{2}, \quad b_0 = \frac{b+a}{2},$$

$$q(\xi) = q_1(\xi) + q_2(\xi), \quad Pe = \frac{V a_0}{2k_2}, \quad H = \frac{\delta_2 k_2}{\alpha}, \quad \varepsilon = \frac{2\lambda_1 h_0}{a_0}, \quad \xi = \frac{x-b_0}{a_0}, \quad r = \frac{(-b_0}{a_0}$$

$$M(X) = e^{-\rho X} \left[ K_0(|X|) - K_1(|X|) \right], \quad \lambda = V X / 2k_2$$

$$N(X) = e^{-\rho X} \left[ I_0(|X|) - I_1(|X|) \right] H(-X), \quad \delta_1 = (1 + \nu_1) \alpha_T^{(b)} / \lambda_1$$

$I_n(\cdot)$ ,  $K_n(\cdot)$  - модифіковані функції Бесселя першого та другого роду відповідно,  $H(\cdot)$  - функція Хевісайда,  $\nu_1$ ,  $\alpha_T^{1,2}$  - коефіцієнти Пуассона і лінійного теплового розширення відповідно,  $\beta$  - постійна Дандерса,  $\epsilon$ ,  $H$  - коефіцієнти, що залежать від термоопору ( $\epsilon$ ) та механічних і теплових властивостей ( $H$ ) співдотичних тіл,  $G_0(\xi)$  - функція, яка описує геометрію поверхні тіл в області контакту.

С.І.Р. (11), (12) разом з додатковою умовою рівноваги тіл розв'язувалась чисельно методом механічних квадратур. Розглянуто випадки взаємодії пружного півпростору із параболічним та плоским штампами.

В четвертій главі досліджується вплив нестационарності фрикційного теплоутворення на температурний та напружений стани взаємодіючих тіл. В § 4.1 побудовано розв'язок нестационарного диференціального рівняння теплопровідності в циліндричній системі координат  $r, \theta, z$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{v^2}{k} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad 0 \leq r < \infty, \quad 0 \leq z < \infty, \quad t > 0, \quad (13)$$

що задовольняє граничним умовам

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} -q(r), & 0 \leq r < 1, \\ 0, & r > 1, \end{cases} \quad z=0, \quad t > 0, \quad (14)$$

$$T \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad (r^2 + z^2)^{1/2} \rightarrow \infty \quad (15)$$

і початковій умові

$$T=0, \quad t=0, \quad (16)$$

де  $q(r) = \gamma \sqrt{r} p(r)$ ,  $\gamma$  - відомий коефіцієнт розподілу теплових потоків,  $p(r)$  - відомий контактний тиск із розв'язку осесиметричної контактної задачі для півпростору у ізотермічному випадку<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Попов Г.Я. Контактная задача теории упругости при наличии круговой области контакта // ПММ. 1962. Т. 26. Вып. I. С. 152-164.

$$p(r) = p_0 (1 - \rho^2)^{-1/2} \sum_{m=0}^{\infty} X_m P_m^*(\rho), \quad P_0 = \frac{3P}{2\pi l^2}, \quad \rho = r/l, \quad (17)$$

де  $P$  - притискаюча сила,  $P_m^*(\rho)$  - поліноми Лежандра із зміщеним аргументом,  $X_m$  - коефіцієнти, що визначаються пружними властивостями опівдотичних тіл та їх геометрією.

Розв'язок крайової задачі (13) - (16) отримано шляхом послідовного застосування інтегральних перетворень Ганкеля нульового порядку по змінній  $r$  та Лапласа по часу  $t$  у вигляді

$$T(\rho, Z, Fo) = \lambda \int_0^{\infty} \varphi(\xi) \Phi_0(\xi, Z, Fo) J_0(\xi \rho) \xi d\xi, \quad (18)$$

$$\varphi(\xi) = \left[ \frac{\pi}{2\xi} \right]^{1/2} \sum_{m=0}^{\infty} X_m \frac{(2m-1)!!}{2^m \cdot m!} J_{\sigma_m}(\xi), \quad \sigma_m = 2m + 1/2, \quad (19)$$

$$\Phi_0(\xi, Z, Fo) = \frac{1}{2} \left[ e^{-\xi \cdot Z} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{2 Fo^{1/2}} - \xi Fo^{1/2} \right) - e^{-\xi \cdot Z} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{2 Fo^{1/2}} + \xi Fo^{1/2} \right) \right], \quad Z = z/l, \quad Fo = kt/l^2, \quad (20)$$

$J_{\sigma_m}(\cdot)$  - функція Бесселя I роду порядку  $\sigma_m$ ,  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  - додатковий інтеграл імовірностей,  $\lambda = \sqrt{G \nu \rho_0} / \lambda$ .

Тут же побудовано розв'язок квазістатичної задачі термопружності, що відповідає температурному полю (18) - (20), при умовах на межі

$$\sigma_z = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad z = 0, \quad 0 \leq r < \infty, \quad (21)$$

$$u_r \rightarrow 0, \quad u_z \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad (r^2 + z^2)^{1/2} \rightarrow \infty. \quad (22)$$

Компоненти тензора температурних напружень  $\sigma_{ij}^t$  у півпросторі знайдено у вигляді інтегралів Ганкеля типу (18).

Показано, що повне поле напружень у півпросторі від дії си-

лового (17) і температурного (18) навантажень можна представити у вигляді

$$\sigma_{1j} = \sigma_{1j}^e + W_t \cdot \sigma_{1j}^t, \quad (23)$$

де термоконтактний критерій  $W_t$  рівний

$$W_t = E\alpha_1 \gamma \Gamma V_1 / (\lambda(1-\nu)). \quad (24)$$

Проведено чисельний аналіз температури (17) та інтенсивності дотичних напружень  $\tau_{\text{окт}}$  в залежності від геометричних ( $\rho, Z$ ) та часових ( $F_0$ ) параметрів у випадку розподілу тиску по Герцу (в співвідношенні (17) слід обмежитись двома першими членами ряду).

На основі побудованого розв'язку крайової задачі теплопровідності (13)-(16) в § 4.2 запропоновано математичну модель дослідження перехідних теплових процесів під час розігрівання та подальшого охолодження (після виходу з контакту) взаємодіючих мікрівиступів шорстких поверхонь. Встановлено, що час виходу температурного поля (17) в стаціонарний стан для металевих поверхонь ( $k=10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $l=17+22 \text{ мкм}$ ) становить  $0,14+0,22 \text{ мс}$ . Характерна тривалість подальшого процесу конвективного охолодження мікрівиступу є на порядок меншою. Сумарна ж тривалість цих перехідних періодів узгоджується з експериментальними даними<sup>2</sup>.

В § 4.3, використовуючи знайдену температуру (17) та напруження (23), пропонується термомеханічний критерій початку зношування конструкційних матеріалів під час фрикційного контактування. Показано, що для матеріалів із лінійною залежністю твердості по Брінелю від температури (сталь ШХ 15, оксидна кераміка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і т.п.) вказаний критерій можна подати у вигляді

$$\frac{P_0}{\sigma_{\text{в}}} \geq \left[ \frac{\max_{Z=0} \left( \frac{\sigma_1}{P_0} + C \cdot W_t \cdot T \right) \right]^{-1}, \quad \text{при } T \leq T_k, \quad (25)$$

$$\frac{P_0}{\sigma_{\text{в}}} \geq \left[ \frac{\max_{Z=0} \left( 2,12 \cdot \frac{\tau_{\text{окт}}}{P_0} + C \cdot W_t \cdot T \right) \right]^{-1}, \quad \text{при } T > T_k, \quad (26)$$

<sup>2</sup> Богданович Н.Н., Белов В.М. Тепловые процессы в зоне контакта трущихся тел // Трение и износ. 1992. Т. 13, № 4. С. 624-632.

де  $\sigma_1$  - максимальне головне напруження,  $\sigma_n^0$  - межа міцності матеріалу при кімнатній температурі,  $T_k$  - температура крихкопластичного переходу даного матеріалу (наприклад, поріг крихколамкості),  $C$  - характерна постійна (для сталі ШХ15  $C=1,096$ ,  $Al_2O_3$  -  $C=1,266$ ). Побудовані карти зношування заданих матеріалів: криві залежностей правих частин нерівностей (25), (26) від термодинамічного критерію  $W_k$  (24); з іншого боку на цій же карті наносяться експлуатаційні точки шляхом задання безрозмірних параметрів  $W_k$  і  $\rho_0/\sigma_n^0$  і за їх положенням робиться висновок чи буде мати місце термомеханічне зношування згідно критеріїв (25), (26). На карті зношування існують області безумовного і умовного зношування, а також область без зношування. В області безумовного зношування (знаходиться вище прямої  $F_0=0$ ) нерівності (25), (26) виконуються завжди. Якщо експлуатаційна точка знаходиться в цій області, зношування відбувається з моменту початку ковзання. Область, що лежить між кривими  $F_0=0$  і  $F_0=\infty$ , називається областю умовного зношування. Якщо експлуатаційна точка розташована в цій області, то час початку зношування визначається кривою, на яку вона попадає. Область, що лежить нижче кривої  $F_0=\infty$ , називається областю без зношування; тут нерівності (25), (26) не виконуються ніколи. Таким чином, карта термомеханічного зношування дозволяє оптимізувати процес зношування при експлуатації фрикційного вузла.

Встановлено добру узгодженість отриманих розрахункових та відомих експериментальних даних для сталі ШХ15.

У підсумках коротко сформульовано отримані результати і висновки, які впливають з проведених у роботі досліджень.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ РОБОТИ

1. Отримано розв'язки двовимірних квазістатичних задач термопружності для півпростору, що нагрівається зосередженими та розподіленими рухомими лінійними джерелами тепла. Температурне поле, переміщення і напруження у півпросторі за допомогою методів контурного інтегрування знайдено в аналітичному вигляді. Побудовано асимптотику поведінки поверхневих термічних переміщень в залежності від величини критерію Біо та параметра Пекле. Досліджено

вплив швидкості руху, інтенсивності розподілу потоків тепла та конвективної тепловіддачі з вільних поверхонь на температуру та термічні переміщення.

2. Розглянута плоска контактна задача термопружності для штамп, що рівномірно ковзає по поверхні пружного півпростору з урахуванням теплоутворення та неідеальності теплового контакту. Задачу зведено до системи сингулярних інтегродиференціальних рівнянь другого роду, розв'язок якої шукається за допомогою методу механічних квадратур. Проаналізовано розв'язки задачі для штампів з параболічною та плоскою основами. У випадку штампу з основою, обмеженою дугою параболи, встановлено, що:

- при фіксованій швидкості ковзання штампу залежність між притискаючою силою  $P$  та розмірами ділянки контакту має лінійний характер;
- існує граничне значення довжини ділянки контакту  $a_{cr}$  при необмеженому ( $P \rightarrow \infty$ ) рості сили  $P$ . Величина  $a_{cr}$  зростає із збільшенням параметра Пекле;
- при фіксованій притискаючій силі збільшення швидкості ковзання штампу веде до зменшення розмірів ділянки контакту.

Для штампу з плоскою основою показано, що значення тиску всередині ділянки контакту є найвищим тоді, коли все тепло, що генерується внаслідок дії сил тертя, направлене в штампі. Криві температури в області контакту згладжуються із збільшенням числа Пекле і при  $Pe \geq 4$  їх можна наближати горизонтальними прямими.

3. Побудовано розв'язок осесиметричної задачі термопружності для півпростору, що нагрівається по круговій області своєї поверхні тепловим потоком з інтенсивністю, пропорційною контактному тиску у відповідній ізотермічній контактній задачі. Задача теплопровідності розглянута в нестационарній постановці, а термопружності - в квазістатичній. Розв'язок отримано з допомогою апарату інтегральних перетворень Ганкеля по радіальній координаті і Лапласа по часу. Аналіз числових результатів у випадку параболічного розподілу тиску показав, що:

- максимальна температура на ділянці контакту виникає в центрі зони нагрівання, де контактний тиск найбільший;
- час, необхідний для виходу температури на ustalений режим становить  $10 l^2 / K$ , де  $l$  - радіус області нагрівання;

- рівень термонапруженого стану півпростору характеризується термоконтактним критерієм  $W_t$  (24), що містить в собі як постійну частину ( механічні та теплофізичні властивості матеріалу), так і змінну, яка визначається умовами контактування;
- існує локальний мінімум значень максимальних октаедричних напружень  $\tau_{\text{окт}}$  в залежності від параметра  $W_t$ ;
- при низьких (менших 5) значеннях параметра  $W_t$  максимальне значення  $\tau_{\text{окт}}$  досягається всередині півпростору; з ростом параметра  $W_t$  це значення виходить на поверхню області нагрівання.

4. Розроблено математичну модель оцінки тривалості перехідних температурних процесів на фрикційному контакті ковзання шорстких тіл. Знайдено розподіл нестационарної температури в околі вершини мікронерівності при її фрикційному нагріванні. Досліджено вплив тепловіддачі вільної поверхні нерівності при виході температури на стаціонарний режим. Оцінена тривалість процесу охолодження після виходу одичинної нерівності з контакту при наявності теплообміну по всій поверхні.

5. Запропоновано термомеханічний критерій початку зношування конструкційних матеріалів при їх фрикційному контактуванні. За заданими параметрами  $W_t$  і  $p_0/\sigma_0^0$  будується карта термомеханічного зношування даного матеріалу, яка дозволяє обирати режим експлуатації, стійкий до зношування.

Результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Евтушенко А.А., Уханская О.М. Квазистационарный термоупругий контакт скольжения с учетом фрикционного разогрева // Трение и износ. 1992. Т. 13, № 5. С. 787-794.
2. Евтушенко А.А., Уханская О.М. Нестационарный фрикционный разогрев при скольжении упругих сжимаемых тел // Прикл. матем. и мех. 1992. Т. 56. Вып. 1. С. III-III7.
3. Евтушенко А.А., Уханская О.М. Распределение температуры при генерации фрикционного тепла между стационарным штифтом и вращающимся цилиндром. // Научный симпозиум "Современные проблемы механики контактных взаимодействий", Ереван, 22-25 ноября 1992 г. Тезисы докладов. Ереван. 1992.
4. Евтушенко О.О., Уханська О.М. Розподіл температури і перемі-

- чень у півпросторі під дією рухомого теплового потоку і конвективного охолодження // Фіз.-хім. мех. матеріалів, 1992. № 3. С. 18-25 с.
5. Євтушенко О.О., Паук В.Я., Уханська О.М. Система інтегральних рівнянь контактної задачі термопружності з врахуванням квазістаціонарного теплоутворення від тертя // Доп. АН України. 1992. № 10. С. 61-65.
  6. Євтушенко А.А., Уханская О.М. Плоская контактная задача термоупругости при квазистационарном теплообразовании от трения // Изв. АН России. Мех. тв. тела. 1993. № 5. С. 37-45.
  7. Євтушенко О.О., Уханська О.М. Розподіл фрикційного тепла між циліндричними елементами трибоспрями. // Фіз.-хім. мех. матеріалів. 1993. № 2. С. 89-96.
  8. Євтушенко О.О., Уханська О.М. Нестационарне теплоутворення на контактні ковзання шоретких поверхонь за умов змішаного тертя // Доп. АН України. 1993. № 11. С. 51-57.
  9. Онишкевич В.М., Уханська О.М., Яськевич І.Т. Врахування теплоутворення і зношування в плоских і осесиметричних контактних задачах // I Міжнар. симпозиум українських інженерів-механіків, Львів, 18-20 травня 1993 р. Тези доповідей. Львів. 1993. С. 93-94.
  10. Yevtushenko A.A., Ukhanska O.M. Plane contact problem of thermoelasticity with quasi-steady frictional heating // Int. J. Engng Sci. 1993. V. 31, № 11. P. 1565-1573.
  11. Євтушенко А.А., Уханская О.М. Определение нестационарных поверхностных искажений осесимметрично нагреваемого полупространства методом функции Грина. // Инж.-физ. журнал. 1994. Т. 66, № 5. С. 627-633.
  12. Євтушенко А.А., Уханская О.М. Термомеханический критерий износа // Трение и износ. 1994. Т. 15, № 3. С. 379-388.
  13. Yevtushenko A.A., Ukhanska O.M. Non-stationary temperature field of discrete sliding contact of elastic bodies // Wear, 1994. V. 176. P. 19-23.
  14. Yevtushenko A.A., Ukhanska O.M. The thermal stresses and displacements in a two-dimensional convective half-space for a moving heat source // Int. J. Heat Mass Transfer. 1994. V. 37, № 17. P. 2737-2743.

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются квазистационарное и нестационарное теплообразование от трения в области Фрикционного контакта упругих тел. Исследуется влияние скорости скольжения, времени и условий контактирования на основные износо-контактные характеристики. Предложен термомеханический критерий начала изнашивания конструкционных материалов.

SUMMARY

The quasi-steady and the non-stationary frictional heatings on the area of elastic bodies contact are considered. The influence of the sliding velocity, the time and the contact conditions on the fundamental wear-contact characteristics is investigated. The thermomechanical criterion of the wear beginning for the construction materials are proposed.

*D. G. ...*





БЕЗПЛАТНО.

AB 31.063