

Вплив тиску заповнювача міжконтактного зазору на часткове проковзування тіл, зумовлене термічними деформаціями

Наталія Маланчук¹, Костянтин Чумак², Богдан Слободян³

¹ К. ф.-м. н., ст. н. с., Інститут прикладних проблеми механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, 79060, e-mail: labmtd@iapmm.lviv.ua

² К. ф.-м. н., ст. н. с., Інститут прикладних проблеми механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, 79060, e-mail: labmtd@iapmm.lviv.ua

³ К. ф.-м. н., ст. н. с., Інститут прикладних проблеми механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, 79060, e-mail: labmtd@iapmm.lviv.ua

Досліджено часткове фрикційне проковзування двох півбезмежних тіл з однакових матеріалів за наявності середовища в міжконтактному зазорі. Причиною мікропроковзування є зумовлені тепловим потоком термічні деформації. Враховано як механічний вплив заповнювача зазору (тиск на поверхні тіл), так і його термічний вплив (термоопір). В якості математичної моделі міжконтактного середовища вибрано ідеальний газ. Сформульовану контактну задачу зведено до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь відносно висоти зазору та відносного зсуву поверхонь тіл та сингулярного інтегродиференціального рівняння типу Прандтля відносно стрибка температури між поверхнями зазору. Числові розрахунки проведено для матеріалу тіл неіржавна сталь AISI 304 за наявності в зазорі повітря або діоксиду вуглецю. Проаналізовано вплив тиску середовища і прикладеного навантаження на ширину зони проковзування та відносний зсув поверхонь тіл.

Ключові слова: часткове проковзування, термічні деформації, міжконтактний зазор, тиск середовища, термоопір.

Вступ. Часткове проковзування (мікропроковзування) тіл, що контактують, характеризується наявністю зон зчеплення та проковзування на інтерфейсі між тілами. В зонах зчеплення дотичні контактні напруження за абсолютною величиною є меншими за контактний тиск, помножений на коефіцієнт тертя, а зсувні переміщення всіх точок поверхонь тіл, що сконтактували під дією нормального навантаження, є однаковими. В зонах проковзування дотичні контактні напруження за абсолютною величиною є рівними контактному тиску, помноженому на коефіцієнт тертя, а зсувні переміщення точок поверхонь тіл є різними. Побудова розв'язків контактних задач про часткове проковзування тіл є важливим з практичної точки зору завданням, оскільки поверхневі ушкодження, зумовлені явищем мікропроковзування, сприяють зародженню втомних тріщин (фретинг-втомі) в елементах машин і конструкцій [1].

Теоретичні дослідження часткового проковзування тіл різної форми в основному проведені для випадку, коли його причиною є прикладене до тіл зсувне навантаження. Огляд цих досліджень наведений в працях [2-6]. Мікропроковзування двох півнескінчених тіл, одне з яких має поверхневу виїмку, з урахуванням тиску ідеального газу в міжконтактному зазорі вивчено в роботі [7].

В праці [8], де розглядався контакт жорсткого прямокутного штампу та пружного півпростору, температури яких є різними, показано, що термічні деформації можуть зумовити виникнення зон мікропроковзування в околі кінців ділянки контакту тіл. Аналогічний ефект виявлено в праці [9] при дослідженні контакту двох пружних півпросторів під дією нормального зовнішнього тиску та стаціонарного теплового потоку за наявності на інтерфейсі одиничного теплоізолюваного зазору. Розроблено аналітично-числову методику розв'язування відповідної контактної задачі та вивчено вплив густини теплового потоку на еволюцію зон проковзування, відносний зсув поверхонь тіл і розподіл дотичних контактних напружень. В подальшому ця методика була поширена на дослідження часткового проковзування двох півнескінчених тіл за наявності між ними періодичної системи зазорів, які є теплоізолюваними або містять теплопровідне середовище, що не чинить тиску на поверхні тіл [10]. Проаналізовано вплив густини теплового потоку та коефіцієнта теплопровідності заповнювача зазорів на розмір зон проковзування, відносний зсув поверхонь тіл і розподіл дотичних контактних напружень.

У даній праці досліджується вплив тиску теплопровідного середовища в одиничному зазорі між пружними півпросторами на явище часткового проковзування, зумовлене термічними деформаціями внаслідок прикладеного теплового потоку. В якості математичної моделі заповнювача зазору вибрано ідеальний газ, стан якого описується рівнянням Клапейрона-Менделєєва. Дана стаття є логічним продовженням робіт [9] і [10] та спирається на їх результати і результати робіт [11] і [12].

1. Формулювання задачі

Розглянемо контактну взаємодію двох пружних ізотропних півплощин D_1 ($y < 0$) і D_2 ($y > 0$) в умовах плоскої деформації (рис. 1). Матеріали тіл є однаковими та характеризуються модулем зсуву G , коефіцієнтами Пуассона ν , лінійного теплового розширення α і теплопровідності λ . У недеформованому стані поверхня верхнього тіла D_2 є плоскою, а поверхня нижнього тіла D_1 вздовж смуги шириною $2b$ має виїмку, форму якої описує функція $r(x) = -r_0(1 - x^2/b^2)^{3/2}$, де $r_0 = r(0)$. Навантаження тіл реалізується в два етапи. На першому етапі тіла притискаються однорідними нормальними зусиллями інтенсивності P . Внаслідок початкової нерівності поверхні нижнього тіла на інтерфейсі виникає зазор висотою $h(x)$ та шириною $2a$ ($a \leq b$). Зазор заповнений ідеальним газом, який чинить рівномірний тиск на поверхні тіл. Для опису його стану використаємо відоме рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$P_g V = m R T_g / \mu, \quad (1)$$

де P_g — тиск газу, $V = l \int_{-a}^a h(x) dx$ — об'єм газу, m — маса газу, μ — молярна маса газу, T_g — абсолютна температура газу (вибрана рівною температурі поверхонь тіл на ділянках контакту та становить 273,15 К), $R = 8,3145$ Дж/(моль·К) — універсальна газова стала, $l = 1$ м. Вважаємо, що зазор є герметичним, тобто середовище не виходить з зазору та його кількість не змінюється в процесі навантаження.

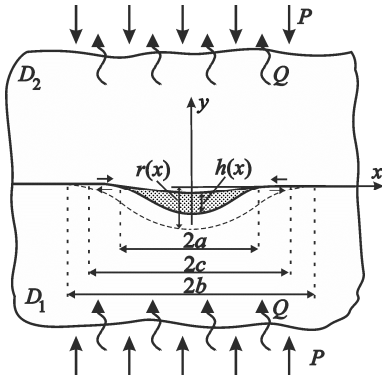


Рис. 1. Модель контакту тіл

Зауважимо, що на першому етапі навантаження дотичні переміщення поверхонь тіл є однаковими внаслідок ідентичності їх матеріалів. Тому на цьому етапі поверхні тіл не проковзують одна відносно іншої.

На другому етапі навантаження нормальні зусилля підтримуються сталими та до тіл на нескінченності перпендикулярно до осі x прикладається тепловий потік густини Q . В околі міжконтактного зазору виникає збурення температурного поля та з'являються термічні деформації, які зумовлюють зародження зон часткового проковзування [9]. Внаслідок симетрії контактної задачі відносно осі y зони мікропроковзування будуть розташовані симетрично відносно центру зазору (ділянки $(-c, -a)$ та $[a, c)$ на рис. 1, стрілками вказано напрям проковзування). Вплив газу на контактний теплообмін моделюємо термоопором $R(x) = h(x) / \lambda_g$ [12], де λ_g — коефіцієнт теплопровідності газу. На ділянках налягання поверхонь тіл тепловий контакт є ідеальним.

Вважаємо, що максимальна глибина виїмки є малою у порівнянні з її шириною, тобто $r_0 \ll 2b$. Таке припущення дозволяє накласти крайові умови на лінії $y = 0$, а не на викривлених поверхнях тіл.

Крайові умови сформульованої контактної задачі термопружності мають наступний вигляд:

на поверхнях зазору ($|x| < a$):

$$T^-(x, 0) - T^+(x, 0) = R(x)q_y^+; \quad q_y^+(x, 0) = q_y^-(x, 0); \quad (2)$$

$$\sigma_{yy}^+(x, 0) = \sigma_{yy}^-(x, 0); \quad \sigma_{yy}^-(x, 0) = -P_g; \quad \sigma_{xy}^+(x, 0) = \sigma_{xy}^-(x, 0); \quad \sigma_{xy}^-(x, 0) = 0; \quad (3)$$

на ділянках контакту ($|x| \geq a$):

$$T^-(x, 0) = T^+(x, 0); \quad q_y^-(x, 0) = q_y^+(x, 0); \quad (4)$$

$$\sigma_{yy}^-(x, 0) = \sigma_{yy}^+(x, 0); \quad \sigma_{xy}^-(x, 0) = \sigma_{xy}^+(x, 0); \quad (5)$$

$$\sigma_{xy}^-(x, 0) = f \operatorname{sgn}(x) \sigma_{yy}^-(x, 0), \quad a \leq |x| < c; \quad (6)$$

$$u_x^-(x, 0) = u_x^+(x, 0), \quad |x| \geq c; \quad u_y^-(x, 0) - u_y^+(x, 0) = -r(x); \quad (7)$$

на нескінченності:

$$q_x(x, \pm\infty) = 0; \quad q_y(x, \pm\infty) = Q; \quad \sigma_{yy}(x, \pm\infty) = -P; \quad \sigma_{xy}(x, \pm\infty) = 0. \quad (8)$$

Тут f — коефіцієнт тертя, q_x і q_y — компоненти вектора теплового потоку, σ_{yy} і σ_{xy} — компоненти тензора напружень, u_x і u_y — компоненти вектора переміщень, верхніми індексами «-» та «+» позначено граничні значення функції на осі x у півплощинах D_1 і D_2 відповідно.

2. Розв'язування задачі

Застосувавши розроблену в праці [9] методику, сформульовану контактну задачу зведено до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) відносно висоти зазору $h(x) = u_y^+(x, 0) - u_y^-(x, 0) - r(x)$ і відносного зсуву поверхонь тіл $U(x) = u_x^-(x, 0) - u_x^+(x, 0)$ та сингулярного інтегро-диференціального рівняння (СІДР) типу Прандтля відносно стрибка температури між берегами зазору $\gamma(x) = T^-(x, 0) - T^+(x, 0)$:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-a}^a \frac{h'(t) dt}{t-x} = -\frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{r'(t) dt}{t-x} + K(P - P_g), \quad |x| < a; \quad (9)$$

$$\lambda_g \frac{\theta(x)}{h(x)} - \frac{\lambda}{2\pi} \int_{-a}^a \frac{\theta'(t) dt}{t-x} = 1, \quad |x| < a; \quad (10)$$

$$\frac{1}{\pi} \int_{-c}^c \frac{U'(t) - \alpha(1+\nu)M(t)}{t-x} dt = -fKL(x), \quad |x| < c. \quad (11)$$

$$\text{Тут } \theta(x) = \gamma(x) / Q, \quad M(x) = \begin{cases} \gamma(x), & |x| < a, \\ 0, & a \leq |x| < c, \end{cases} \quad L(x) = \begin{cases} 0, & |x| < a, \\ \operatorname{sgn}(x) \sigma_{yy}^-(x, 0), & a \leq |x| < c, \end{cases}$$

$$\sigma_{yy}^-(x, 0) = \frac{1}{\pi K} \left(\int_{-a}^a \frac{h'(t) dt}{t-x} + \int_{-b}^b \frac{r'(t) dt}{t-x} \right) - P, \quad K = 2(1-\nu) / G.$$

Функції $h(x)$, $\gamma(x)$ та $U(x)$ задовольняють умови [9, 12]:

$$h(\pm a) = 0, \quad h'(\pm a) = 0, \quad \gamma(\pm a) = 0, \quad \gamma'(\pm a) = 0, \quad U(\pm c) = 0, \quad U'(\pm c) = 0. \quad (12)$$

В рівняннях (9)-(11) відомими величинами є інтенсивність зовнішнього тиску P , густина теплового потоку Q , максимальна висота r_0 і ширина $2b$ виїмки, механічні і фізичні властивості матеріалів тіл — G , ν , α , λ і f , маса m і молекулярна маса μ газу, коефіцієнт теплопровідності газу λ_g . Окрім $h(x)$, $\gamma(x)$ і $U(x)$, в рівняннях (9)-(11) невідомими є також півширина зазору a , тиск газу P_g і координата краю зони проковзування c . Для їх знаходження буде використано умову існування обмеженого розв'язку СІР (9), рівняння Клапейрона-Менделєєва (1) та п'яту умову в (12).

Розв'язавши СІР (9) для заданої форми виїмки, знайдемо [11]:

$$h(x) = r_0(a^2 - x^2)^{3/2} / b^3, \quad |x| \leq a; \quad (13)$$

$$P_g = P - 3r_0(b^2 - a^2) / (2Kb^3); \quad (14)$$

$$V = 3r_0a^4\pi / (8b^3); \quad (15)$$

$$\sigma_{yy}^-(x, 0) = 3r_0 \left[2|x|H(|x|-b)\sqrt{x^2-b^2} - 2|x|H(|x|-a)\sqrt{x^2-a^2} + b^2 - a^2 \right] / (2Kb^3) - P, \quad |x| < \infty, \quad (16)$$

де $H(x) = 0$, якщо $x < 0$, та $H(x) = 1$, якщо $x \geq 0$.

Усі вирази (13)-(16) містять невідому півширину зазору a . Якщо підставити (14) і (15) в (1), отримаємо бікубічне рівняння відносно a . Зважаючи на громіздкість математичних викладок при розв'язуванні цього рівняння, більш зручно задати півширину зазору a та знайти послідовно на основі формул (15), (1), (14) і (16) об'єм газу V , тиск газу P_g , зовнішній тиск P і контактні напруження $\sigma_{yy}^-(x, 0)$, які відповідають заданому значенню a .

Підставивши висоту зазору $h(x)$ в СІДР типу Прандтля (10), знайдемо його розв'язок, який відповідає заданій півширині зазору a . Він має вигляд [12]:

$$\theta(x) = \frac{\lambda_g}{\lambda} \sqrt{a^2 - x^2} \sum_{s=1}^S A_s \left(\frac{U_{2s-2}(x/a)}{2s-1} - \frac{U_{2s}(x/a)}{2s+1} \right), \quad |x| \leq a, \quad (17)$$

де сталі A_s , $s = 1, \dots, S$, визначаються з системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{s=1}^S A_s \left[\frac{\lambda_g b^3}{\lambda r_0 (a^2 - x_k^2)} \left(\frac{U_{2s-2}(x_k/a)}{2s-1} - \frac{U_{2s}(x_k/a)}{2s+1} \right) - T_{2s}(x_k/a) \right] = \frac{1}{\lambda_g},$$

$$x_k = a \cos((2k-1)\pi / (4S+4)), \quad k = 1, \dots, S;$$

$T_s(x)$ і $U_s(x)$ — многочлени Чебишева першого і другого роду відповідно.

Підставивши контактні напруження $\sigma_{yy}^-(x, 0)$ та стрибок температури $\gamma(x) = Q\theta(x)$ в СІР (11) та розв'язавши його, отримуємо [9]:

$$U(x) = \alpha(1 + \nu)N(x) - \frac{Kf}{2\pi} \sum_{j=0}^{n-1} B_j \left[(x - \xi_{j+1})\Gamma(c, x, \xi_{j+1}) - (x - \xi_j)\Gamma(c, x, \xi_j) + 2\varphi_1(x, c) \left(\varphi_2(c, \xi_{j+1}) - \varphi_2(c, \xi_j) \right) \right], \quad |x| \leq c; \quad (18)$$

$$Q = \frac{2K\lambda f}{\alpha(1 + \nu)\lambda_g A_1 a^2 \pi} \sum_{j=0}^{n-1} B_j \left(\varphi_2(c, \xi_{j+1}) - \varphi_2(c, \xi_j) \right). \quad (19)$$

Тут $B_j = L(\xi_j)$, $\xi_j = -c + 2jc/n$, $j = 0, \dots, n$; $\varphi_1(x, c) = \arcsin(x/c) + \pi/2$;

$$\varphi_2(x, c) = \sqrt{c^2 - x^2}; \quad \Gamma(c, x, t) = \ln \left(\frac{c^2 - tx + \varphi_2(x, c)\varphi_2(t, c)}{c^2 - tx - \varphi_2(x, c)\varphi_2(t, c)} \right);$$

$$N(x) = \begin{cases} 0, & x \in [-c, -a], \\ \frac{\lambda_g Q}{2\lambda} \left[A_1 \varphi_3(x, a) + a \varphi_2(x, a) \cdot \left(\sum_{s=2}^S \frac{A_s W_{s-1}(x, a)}{2s-1} - \sum_{s=1}^S \frac{A_s W_s(x, a)}{2s+1} \right) \right], & x \in [-a, a], \\ \lambda_g Q A_1 a^2 \pi / (2\lambda), & x \in [a, c]; \end{cases}$$

$$\varphi_3(x, a) = x\varphi_2(x, a) + a^2\varphi_1(x, a); \quad W_s(x, a) = U_{2s+1}(x/a)/(2s+2) - U_{2s-1}(x/a)/(2s).$$

Співвідношення (19) пов'язує координату краю зони проковзування c та тепловий потік Q . Зважаючи на структуру (19), очевидно, що більш зручно задати значення c та обчислити на основі (19) значення Q , яке відповідає заданим a і c .

3. Аналіз результатів числових розрахунків

При проведенні числових розрахунків вважалося, що: матеріал тіл — неіржавна сталь AISI 304 ($G = 77,0029 \cdot 10^3$ МПа, $\nu = 0,2532$, $\alpha = 17,3 \cdot 10^{-6}$ 1/К, $\lambda = 16,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(мм·К) [13], $f = 0,74$ [14]), заповнювач зазору — повітря ($\mu = 28,966$ г/моль, $\lambda_g = 0,026 \cdot 10^{-3}$ Вт/(мм·К) [15]) або діоксид вуглецю ($\mu = 44,01$ г/моль, $\lambda_g = 0,017 \cdot 10^{-3}$ Вт/(мм·К) [15]), максимальна глибина виїмки — $r_0 = 0,001$ мм, півширина виїмки — $b = 1$ мм. Розрахунки проводилися для наступних діапазонів зміни півширини зазору a та координати краю зони проковзування c : $0 < a \leq b$, $a < c \leq 1,5b$.

Таблиця 1

Дані, які відповідають кривим на рис. 2					
Крива	P , МПа	P_g , МПа	m , г·10 ⁵		a , мм
			Повітря (суцільна крива)	Діоксид вуглецю (штрихова крива)	
1	10	0	0	0	0,9331
2		0,1	0,1143	0,1736	0,9338
3		1	1,1732	1,7825	0,94
4		2,5	3,063	4,654	0,9502
5		5	6,5727	9,9864	0,9671
6		7,5	10,5524	16,033	0,9837
7		10	15,0257	22,8295	1
Дані, які відповідають кривим на рис. 3					
Крива	P , МПа	P_g , МПа	m , г·10 ⁵		a , мм
			Повітря (суцільна крива)	Діоксид вуглецю (штрихова крива)	
1	50	0	0	0	0,5945
2		0,1	0,0189	0,0287	0,5956
3		1	0,2017	0,3064	0,6053
4		2,5	0,5590	0,8494	0,6211
5		5	1,3133	1,9954	0,6466
6		7,5	2,2863	3,4738	0,6711
7		10	3,5018	5,3205	0,6948

На рис. 2 та 3 зображено залежність ширини зони проковзування $d = c - a$ від густини теплового потоку Q для різних величин тиску газу за навантаження $P = 10$ МПа та $P = 50$ МПа відповідно. Суцільні криві побудовані для повітря, штрихові криві — для діоксиду вуглецю. Дані, які відповідають кривим на цих рисунках, наведені в табл. 1.

Криві на рис. 2 і 3 (окрім кривих 7 на рис. 2, для яких $a = b$) мають злом в точці $d = b - a$ ($c = b$). Зазначимо, що точки кривої $d = d(Q)$ при $d < b - a$ (точки, які лежать нижче точки злому) відповідають випадку, коли мікропроковзування відбувається в межах виїмки ($c < b$), а точки при $d > b - a$ (точки, які лежать вище точки злому) — випадку, коли зона мікропроковзування поширилася за межі виїмки ($c > b$). Аналогічні зломи були виявлені в попередніх працях [9, 10].

Ширина зони проковзування d збільшується зі збільшенням густини теплового потоку. За $P = 10$ МПа (рис. 2) d нелінійно залежить від Q , коли $P_g \geq 5$ МПа та $c > b$. За $P = 50$ МПа (рис. 3) d нелінійно залежить від Q для всіх розглянутих значень P_g , коли $c < b$. Для решти значень P_g і c зміна d змінюю Q відбувається за законом, близьким до лінійного. За фіксованого Q зміна тиску середовища в зазорі практично не впливає на зміну ширини зони мікропроковзування, якщо $c < b$; якщо $c > b$, вплив тиску середовища є значним. За фіксованих P , Q і P_g ширина зони проковзування у випадку наявності в

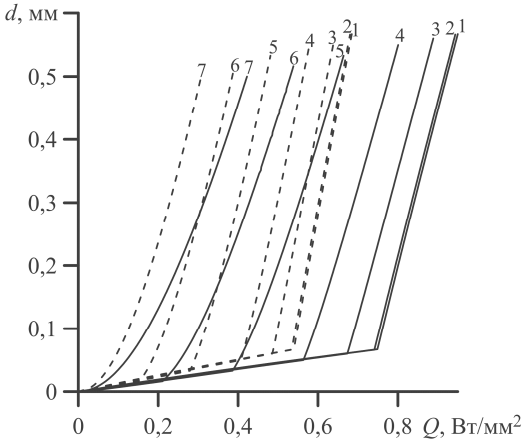


Рис. 2. Залежність ширини зони проковзування d від густини теплового потоку Q для зовнішнього тиску $P=10$ МПа

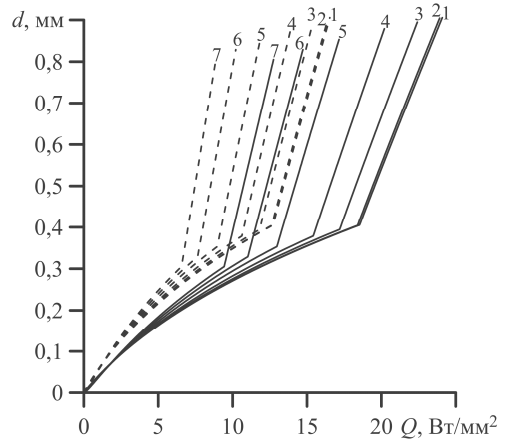


Рис. 3. Залежність ширини зони проковзування d від густини теплового потоку Q для зовнішнього тиску $P=50$ МПа

зазорі діоксиду вуглецю є більшою, ніж ширина зони проковзування у випадку наявності в зазорі повітря, причому, чим більшим є значення P_g , тим більшою є ця різниця.

З рис. 2 і 3 також бачимо, що криві 1, які відповідають випадку, коли середовище не чинить тиск на поверхні тіл ($P_g = 0$ МПа), практично співпадають з кривими 2, які побудовані для випадку, коли тиск середовища рівний атмосферному тиску ($P_g = 0,1$ МПа).

На рис. 4 та 5 зображено вплив тиску газу P_g на відносний зсув поверхонь тіл $U(x)$ для $P=10$ МПа і $Q=0,5$ Вт/мм², коли зазор заповнений повітрям та діоксидом вуглецю відповідно. Криві на цих рисунках якісно повторюють

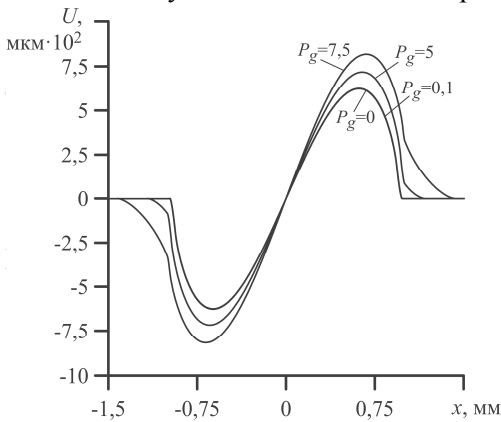


Рис. 4. Відносний зсув поверхонь тіл $U(x)$, $P=10$ МПа, $Q=0,5$ Вт/мм², середовище — повітря

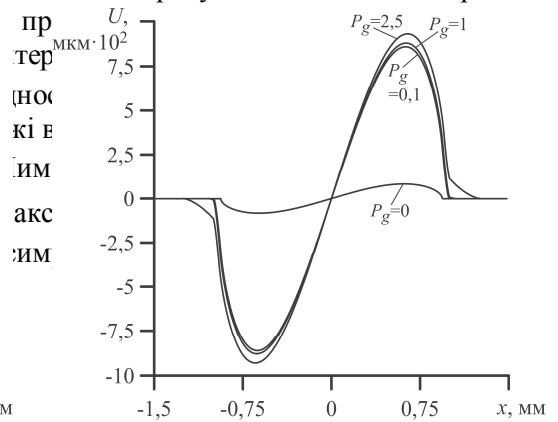


Рис. 5. Відносний зсув поверхонь тіл $U(x)$, $P=10$ МПа, $Q=0,5$ Вт/мм², середовище — діоксид вуглецю

Якщо зазор містить повітря, то $U(x)$ є практично однаковим за $P_g = 0$ МПа і $P_g = 0,1$ МПа. Якщо зазор заповнений діоксидом вуглецю, то $U(x)$ значно відрізняється за $P_g = 0$ МПа і $P_g = 0,1$ МПа, незважаючи на близькі значення ширини зон проковзування.

Висновки. В роботі досліджено фрикційний контакт двох півбезмежних тіл, поверхня одного з яких має одиничну виїмку малої висоти, за наявності на інтерфейсі між ними зазору, заповненого середовищем (ідеальним газом), та зон часткового проковзування. Газ чинить рівномірний тиск на поверхні тіл та створює термоопір, залежний від висоти зазору та коефіцієнта теплопровідності середовища. На ділянках налягання поверхонь тіл тепловий контакт є ідеальним. Явище мікропроковзування спричинене термічними деформаціями, які зумовлені прикладеним тепловим потоком.

Сформульовану контактну задачу зведено до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь відносно висоти зазору і відносного зсуву поверхонь тіл та сингулярного інтегро-диференціального рівняння типу Прандтля відносно стрибка температури між поверхнями зазору. Отримано аналітично-числовий розв'язок цієї системи рівнянь та проаналізовано вплив тиску міжконтактного середовища і прикладеного навантаження на розмір зон проковзування і відносний зсув поверхонь тіл

Встановлено наступне:

- якщо мікропроковзування відбувається в межах виїмки, вплив тиску середовища на ширину зони проковзування є незначним;
- якщо мікропроковзування поширилося за межі виїмки, вплив тиску середовища на ширину зони проковзування є істотним;
- ширина зони проковзування за нехтування механічним впливом середовища практично не відрізняється від ширини зони проковзування за тиску середовища, рівного атмосферному тиску;
- максимальне значення відносного зсуву поверхонь тіл зростає зі збільшенням тиску середовища;
- за фіксованих значень зовнішнього навантаження і тиску середовища ширина зони проковзування у випадку наявності в зазорі діоксиду вуглецю є більшою, ніж ширина зони проковзування у випадку наявності в зазорі повітря.

Робота виконана за підтримки Національної академії наук України (проект НДР молодих учених НАН України у 2016 р., договір ВБМ-424).

Література

- [1] Hills D. A., Nowell D. Mechanics of fretting fatigue. — Springer Science+Business Media: Dordrecht, 1994. — 246 p.
- [2] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир, 1989. — 510 с.

- [3] *Hills, D. A., Sosa, G. U.* Origins of partial slip in fretting — a review of known and potential solutions // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. — 1999. — Vol. 34, No 3. — P. 175-181.
- [4] *Острык В. И., Улитко А. Ф.* Метод Винера–Хопфа в контактных задачах теории упругости. — К.: Наукова думка, 2006. — 328 с.
- [5] *Block J. M., Keer L. M.* Periodic contact problems in plane elasticity // *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. — 2008. — Vol. 3, No 7. — P. 1207-1237.
- [6] *Горячева И. Г., Маланчук Н. И., Мартыняк Р. М.* Контактное взаимодействие тел с периодическим рельефом при частичном проскальзывании // *Прикладная математика и механика*. — 2012. — Т. 76, № 5. — С. 695-709.
- [7] Локальне проковзування пружних тіл за наявності газу в міжконтактному зазорі / *Слободян Б. С., Маланчук Н. І., Мартыняк Р. М., Ляиенко Б. А., Марчук В. С.* // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 91-96.
- [8] *Pauk V.* Plane contact of hot flat-ended punch and thermoelastic half-space involving finite friction // *ASME Journal of Applied Mechanics*. — 2007. — Vol. 74, No 6. — P. 1172-1177.
- [9] *Malanchuk N., Martynyak R., Monastyrskyy B.* Thermally induced local slip of contacting solids in vicinity of surface groove // *International Journal of Solids and Structures*. — 2011. — Vol. 48, No 11-12. — P. 1791-1797.
- [10] *Chumak K., Malanchuk N., Martynyak R.* Partial slip contact problem for solids with regular surface texture assuming thermal insulation or thermal permeability of interface gaps // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2014. — Vol. 84. — P. 138-146.
- [11] *Кум Г. С., Мартыняк Р. М., Мачишин И. М.* Влияние газожидкостного заполнителя межконтактного пространства на напряженное состояние сопряженных тел // *Прикладная механика*. — 2003. — Т. 39, № 3. — С. 52-60.
- [12] *Мартыняк Р.М., Чумак К.А.* Термопружний контакт півпросторів, що мають однакові термічні дистортивності, за наявності теплопроникного міжповерхневого просвіту // *Математичні методи та фізико-механічні поля*. — 2008. — Т. 51, № 3. — С. 163-175.
- [13] *Engineering properties of steel*; Editor: *Ph. D. Harvey*. — American Society for Metals: Metals Park, OH, 1982. — 620 p.
- [14] *CRC handbook of physical quantities*; Editors: *I. S. Grigoriev, E. Z. Meilikhov*. — CRC Press, Boca Raton, FL, 1997. — 1548 p.
- [15] *CRC handbook of engineering tables*; Editor: *R. C. Dorf*. — CRC Press, Boca Raton, FL, 2003. — 656 p.

Effect of pressure of intercontact gap filler on partial slip of bodies caused by thermal strains

Nataliya Malanchuk, Kostyantyn Chumak, Bogdan Slobodian

The partial frictional slip of two semi-infinite bodies of similar materials in the presence of a medium in an intercontact gap has been investigated. The cause of microslip is thermal strains induced by heat flow. Both mechanical influence (pressure on the surfaces of the bodies) and thermal influence (thermal resistance) of the gap filler have been taken into account. As a mathematical model of the interstitial medium, the ideal gas has been chosen. The formulated contact problem has been reduced to two singular integral equations for a gap height and a relative shift of the surfaces of the bodies and a Prandtl singular integro-differential equation for a temperature jump between the gap surfaces. Numerical calculations have been carried out when the material of the bodies is stainless steel AISI 304 in the presence of air or carbon dioxide in the gap. The effect of the medium pressure and applied load on the width of the slip zones and the relative shift of the surfaces of the bodies has been analyzed.

Влияние давления заполнителя межконтактного зазора на частичное проскальзывание тел, обусловленное термическими деформациями

Наталия Маланчук, Константин Чумак, Богдан Слободян

Исследовано частичное фрикционное проскальзывание двух полубесконечных тел из одинаковых материалов при наличии среды в межконтактном зазоре. Причиной микропроскальзывания являются обусловленные тепловым потоком термические деформации. Учтено как механическое влияние заполнителя зазора (давление на поверхности тел), так и его термическое влияние (термосопротивление). В качестве математической модели межконтактной среды выбрано идеальный газ. Сформулированную контактную задачу сведено к системе двух сингулярных интегральных уравнений относительно высоты зазора и относительного сдвига поверхностей тел и сингулярного интегро-дифференциального уравнения типа Прандтля относительно скачка температуры между поверхностями зазора. Числовые расчеты проведено для материала тел нержавеющая сталь AISI 304 при наличии в зазоре воздуха или диоксида углерода. Проанализировано влияние давления среды и приложенной нагрузки на ширину зон проскальзывания и относительный сдвиг поверхностей тел.

Отримано 17.11.16