

Термопружна взаємодія тіл з урахуванням термоопору та тиску ідеального газу в міжконтактному зазорі

Костянтин Чумак¹, Богдан Слободян¹, Наталія Маланчук¹

¹ к. ф.-м. н., с. 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 термопружний контакт двох півбезмежних тіл з різних матеріалів за наявності газу в зазорі, зумовленого виїмкою малої висоти на поверхні одного з тіл. Газ чинить рівномірний тиск на поверхні зазору та створює додатковий термоопір, залежний від висоти зазору. За математичну модель газу вибрано ідеальний газ, стан якого описує рівняння Клапейрона-Менделєєва. Враховано вплив тиску газу, силового та теплового навантаження на деформування зазору. Сформульовану контактну задачу зведено до системи двох нелінійних сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь щодо висоти зазору та стрибка температури між його поверхнями, розв'язок якої побудовано з застосуванням методу послідовних наближень. Для знаходження тиску газу використано рівняння Клапейрона-Менделєєва, в якому враховано залежність температури газу від температур поверхонь зазору. Числові розрахунки проведено для пари матеріалів неіржавна сталь AISI 304 — сплав алюмінію A380 за наявності в зазорі повітря, аргону, криптону або гелію. Проаналізовано вплив маси газу, густини теплового потоку й інтенсивності зовнішнього тиску на ширину зазору, температуру газу, контактний термоопір тіл і рівень термічної ректифікації.

Ключові слова: термопружний контакт, ідеальний газ, міжконтактний зазор, контактний термоопір, термічна ректифікація.

Вступ. Елементом і деталям сучасної техніки притаманна наявність поверхневих нерівностей малої висоти (виїмок, заглибин, виступів тощо), часто нанесених штучно з метою покращення їх функціональних властивостей. Під час контактної взаємодії тіл з поверхневими нерівностями на інтерфейсі між ними виникають зазори, які зазвичай заповнені середовищем. Воно чинить тиск на поверхні тіл (механічний вплив заповнювача) та створює додатковий термічний опір (термічний вплив заповнювача), а тому впливає на розподіл температури, напружень і переміщень у тілах, контактну міцність, жорсткість і провідність. Типовими прикладами заповнювача міжконтактних зазорів є природна субстанція (газ, рідина), речовина функціонального призначення (мастило, охолоджувальна суміш), біологічна рідина (синовіальна рідина в суглобах).

На сьогодні в більшості досліджень впливу середовища в міжконтактних зазорах на контактну взаємодію тіл окремо розглянуто його механічний [1-11] та термічний вплив [12-21]. Дослідження, які одночасно враховують термічний і механічний вплив заповнювача зазорів, обмежуються роботами [22-26], де вплив теплового навантаження на зміну геометричних параметрів зазорів не розглядався.

Проте термічне деформування спряжених тіл, яке зумовлене прикладним тепловим потоком, може істотно вплинути на кривину поверхонь, що контактують, а, отже, і на розміри міжконтактних зазорів і величину їх термоопору. Водночас, результати теоретичних досліджень термопружного контакту тіл з різних матеріалів у вакуумі [27-31] і теплопровідному середовищі [20], у яких було враховано вплив термічних деформацій на розмір ділянок контакту, показали залежність контактного термоопору від зміни напрямку теплового потоку на протилежний. Цей феномен, який був неодноразово підтверджений експериментально (наприклад, [29, 32, 33]), відомий у науковій літературі під назвою «термічна ректифікація» або «ефект напрямленості теплового потоку».

У цій роботі проведено дослідження термопружного контакту двох півбезмежних тіл з різних матеріалів, на інтерфейсі між якими знаходиться одиничний зазор, з урахуванням термоопору і тиску міжконтактного газу та деформування зазору внаслідок силового і теплового навантаження. За математичну модель газу вибрано ідеальний газ, стан якого описує рівняння Клапейрона-Менделєєва. Розв'язок аналогічної контактної задачі термопружності за нехтування механічним впливом міжконтактного середовища побудовано в роботі [18], а дослідження контактного термоопору та термічної ректифікації для такої структури без урахування тиску заповнювача зазору здійснено в праці [20].

1. Формулювання задачі

Розглянемо взаємодію двох півбезмежних тіл D_1 і D_2 за умов плоскої деформації під дією заданих на нескінченності нормальних до інтерфейсу стискальних однорідних зусиль p та стаціонарного теплового потоку q (рис. 1). Матеріали тіл є пружними й ізотропними та характеризуються різними модулями Юнга E_1, E_2 , коефіцієнтами Пуассона ν_1, ν_2 , лінійного теплового розширення α_1, α_2 і теплопровідності λ_1, λ_2 . У недеформованому стані поверхня нижнього тіла є ідеально плоскою, а поверхня верхнього має виїмку, форма якої описується

функцією $r(x) = r_0 \left(1 - x^2/b^2\right)^{3/2}$. Ширина

виїмки $2b$ значно перевищує її максимальну висоту, тобто $r_0 \ll 2b$. Під час контакту тіл зазор на інтерфейсі між ними містить газ з коефіцієнтом теплопровідності λ , який чинить рівномірний тиск p_g на поверхні тіл.

Вважаємо, що ширина зазору $2a$ не перевищує ширину виїмки $2b$, тобто $a \leq b$. За математичну модель газу вибрано ідеальний газ, стан якого описує рівняння Клапейрона-Менделєєва:

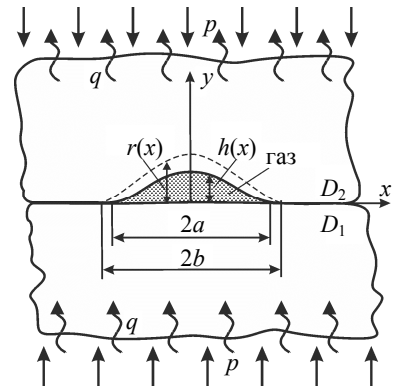


Рис. 1. Модель контакту тіл

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

де V — об'єм газу з розрахунку на одиницю довжини зазору, m і μ — маса та молярна маса газу, T_g — абсолютна температура газу, $R = 8,3145$ Дж/(моль·К) — універсальна газова стала, $l = 1$ м.

Абсолютну температуру газу T_g пов'яжемо з температурами поверхонь зазору за допомогою такого співвідношення:

$$T_g = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \frac{T^-(x,0) + T^+(x,0)}{2} dx + T_0. \quad (2)$$

Тут T — температура, індексами «+» і «-» позначено її граничні значення на осі Ox у верхньому та нижньому тілі відповідно; $T_0 = 273,15$ К.

Вплив газу на контактний теплообмін враховуємо термоопором [16-18]:

$$R(x) = h(x)/\lambda, \quad (3)$$

де $h(x)$ — висота міжконтактного зазору.

Контактний термоопір зумовлює неідеальний тепловий контакт тіл на ділянці зазору, внаслідок чого між його поверхнями виникає стрибок температури

$$\gamma(x) = T^-(x,0) - T^+(x,0), \quad |x| < a. \quad (4)$$

На ділянках налягання поверхонь тіл сили тертя відсутні, а тепловий контакт є ідеальним. Щоб запобігти глобальному викривленню тіл, зумовленому тепловим потоком q , до кожного з тіл на великій відстані ($x \rightarrow \pm\infty$) прикладено відповідні зусилля σ_{xx} [28].

Зважаючи на вищесказане, крайові умови сформульованої контактної задачі термопружності є такими:
 на ділянках контакту ($|x| \geq a$):

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

вздовж зазору ($|x| < a$):

$$T^- - T^+ = R(x)q_y^+, \quad q_y^+ = q_y^-, \quad \sigma_{yy}^+ = -p_g, \quad \sigma_{yy}^- = \sigma_{yy}^+, \quad \sigma_{xy}^- = \sigma_{xy}^+ = 0; \quad (6)$$

на нескінченності:

$$q_x(x, \pm\infty) = 0, \quad q_y(x, \pm\infty) = q, \\ \sigma_{yy}(x, \pm\infty) = -p, \quad \sigma_{xy}(x, \pm\infty) = 0, \quad \sigma_{xx}(\pm\infty, y) = -\alpha_j E_j q y / (\lambda_j (1 - \nu_j)). \quad (7)$$

Тут q_x, q_y — компоненти вектора теплового потоку; $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$ — компоненти тензора напружень; u_y — компонента вектора переміщень в напрямку осі Oy .

Вхідними параметрами задачі є густина теплового потоку q , інтенсивність зовнішнього тиску p , максимальна висота r_0 і ширина $2b$ виїмки, фізичні та

механічні властивості матеріалів тіл ($\alpha_1, \alpha_2, \lambda_1, \lambda_2, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$), маса m і молекулярна маса μ газу, коефіцієнт теплопровідності газу λ . Шуканими параметрами задачі є висота $h(x)$ і ширина $2a$ зазору, стрибок температури $\gamma(x)$, тиск p_g , об'єм V й абсолютна температура T_g газу та термоопір зазору $R(x)$, який у рамках сформульованої задачі є контактним термоопором досліджуваної структури.

2. Розв'язування задачі

З використанням методики, описаної в роботах [5, 6, 18], сформульовану контактну задачу зведено до системи двох сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь (СІДР) щодо висоти зазору $h(x)$ і стрибка температури $\gamma(x)$:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} \int_{-a}^a \frac{h'(t)}{t-x} dt - \frac{\lambda_{12}}{2} (\delta_1 - \delta_2) \gamma(x) = \\ & = f(x) + \frac{K(p - p_g)}{2}, \quad |x| < a, \quad h(\pm a) = 0, \quad h'(\pm a) = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\gamma(x)}{h(x)} - \frac{\lambda_{12}}{2\pi} \int_{-a}^a \frac{\gamma'(t)}{t-x} dt = q, \quad |x| < a, \quad \gamma(\pm a) = 0, \quad \gamma'(\pm a) = 0. \quad (9)$$

Тут $\delta_i = \alpha_i(1 + \nu_i)/\lambda_i$ ($i=1, 2$); $\lambda_{12} = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$; $f(x) = 3r_0(x^2/b^2 - 0,5)/b$; $K = 4(1 - \nu_1^2)/E_1 + 4(1 - \nu_2^2)/E_2$.

З рівняння (8) випливає, що висота зазору $h(x)$ залежить від зовнішнього тиску і тиску газу, а також від стрибка температури $\gamma(x)$, який, як випливає з рівняння (9), залежить від теплового потоку, зовнішнього тиску і тиску газу. Отже, сформульована контактна задача є взаємозв'язаною задачею термопружності.

Оскільки кожне з рівнянь системи СІДР (8), (9) містить дві шукані функції $h(x)$ і $\gamma(x)$, а друге рівняння містить частку цих функцій, система СІДР (8), (9) є функціонально нелінійна. До розв'язування цієї системи застосуємо розроблену в роботі [18] процедуру, в основу якої покладено метод послідовних наближень. Особливістю такої процедури є те, що ширина зазору $2a$ виводиться з переліку шуканих параметрів задачі, а зовнішній тиск p вважається невідомим і для його визначення на кожному ітераційному кроці використовується умова плавного змикання поверхонь зазору $h'(\pm a) = 0$. Це дозволяє спростити побудову розв'язку системи СІДР та отримати його для дискретного набору значень ширини зазору. Зважаючи на громіздкість ітераційної процедури, не будемо вдаватись у деталі та наведемо нижче лише кінцевий результат:

$$h(x) = \sqrt{a^2 - x^2} \left[\sum_{n=0}^N A_n U_{2n}(x/a) + W \sum_{m=0}^M B_m U_{2m}(x/a) \right], \quad |x| \leq a, \quad (10)$$

$$\gamma(x) = \frac{\lambda}{\lambda_{12}} \sqrt{a^2 - x^2} \sum_{s=1}^S C_s \left[\frac{U_{2s-2}(x/a)}{2s-1} - \frac{U_{2s}(x/a)}{2s+1} \right], \quad |x| \leq a, \quad (11)$$

$$p = p_g - W, \quad W = - \sum_{n=0}^N (2n+1)A_n \left/ \sum_{m=0}^M (2m+1)B_m \right., \quad (12)$$

де сталі A_n ($n = \overline{1, N}$), B_m ($m = \overline{1, M}$), C_s ($s = \overline{1, S}$) визначаються з систем лінійних алгебраїчних рівнянь, вигляд яких можна знайти в роботі [18]; $U_n(x)$ — поліном Чебишева другого роду степеня n .

Виразивши об'єм газу V через його висоту $h(x)$, з урахуванням співвідношення (10) отримаємо

$$V = \int_{-a}^a h(x) dx = \pi a^2 (A_0 + WB_0) / 2. \quad (13)$$

Оскільки $T^-(x, 0) = \lambda_{12} \gamma(x) / (2\lambda_1)$ і $T^+(x, 0) = -\lambda_{12} \gamma(x) / (2\lambda_2)$ [18], то температуру газу T_g (2) можна виразити через стрибок температури $\gamma(x)$:

$$T_g = \frac{\lambda_{12}^*}{4a} \int_{-a}^a \gamma(x) dx + T_0. \quad (14)$$

Тут $\lambda_{12}^* = (\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_2 + \lambda_1)$.

Враховавши формулу (11) у виразі (14), отримаємо

$$T_g = \lambda_{12}^* \lambda \pi a C_1 / (8\lambda_{12}) + T_0. \quad (15)$$

За відомих об'єму V та температури T_g газу тиск p_g визначимо з рівняння Клапейрона-Менделєєва (1):

$$p_g = \frac{mR (\pi a C_1 \lambda_{12}^* \lambda + 8\lambda_{12} T_0)}{4\lambda_{12} \pi l a^2 \mu (A_0 + WB_0)}. \quad (16)$$

3. Аналіз результатів числових розрахунків

Числові розрахунки здійснено для пари матеріалів неіржавна сталь AISI 304 (матеріал тіла D_1) — сплав алюмінію А380 (матеріал тіла D_2). Їх фізичні та механічні властивості наведені в табл. 1. Заповнювачем зазору вибрано такі гази: повітря, аргон, гелій і криптон. Їх властивості наведені в табл. 2. Геометричні параметри виїмки є такі: $b = 1$ мм, $r_0 = 0,01$ мм.

З метою аналізу впливу напрямку теплового потоку на контактну взаємодію тіл і дослідження рівня термічної ректифікації числові розрахунки було проведено для двох протилежних напрямів теплового потоку: від неіржавної сталі AISI 304 до сплаву алюмінію А380 (у цьому випадку напрям теплового потоку співпадає з напрямом осі Oy , тобто $q > 0$) та від сплаву алюмінію А380 до неіржавної сталі AISI 304 (у цьому випадку напрям теплового потоку протилежний до напрямку осі Oy , тобто $q < 0$).

Таблиця 1

Фізичні та механічні властивості матеріалів тіл

Матеріал тіла D_i	$\alpha_i, 1/K$	$\lambda_i, \text{Вт}/(\text{мм}\cdot\text{К})$	$E_i, \text{МПа}$	ν_i
Неіржавна сталь AISI 304 [34] ($i=1$)	$17,3 \cdot 10^{-6}$	$16,3 \cdot 10^{-3}$	$193 \cdot 10^3$	0,2532
Сплав алюмінію А380 [35] ($i=2$)	$21,8 \cdot 10^{-6}$	$96,2 \cdot 10^{-3}$	$71 \cdot 10^3$	0,33

Таблиця 2

Властивості газів

Газ	$\mu, \text{г}/\text{моль}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{мм}\cdot\text{К})$	Газ	$\mu, \text{г}/\text{моль}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{мм}\cdot\text{К})$
Повітря [36]	28,966	$0,026 \cdot 10^{-3}$	Гелій [36]	4,0026	$0,149 \cdot 10^{-3}$
Аргон [36]	39,948	$0,0172 \cdot 10^{-3}$	Криптон [36]	83,80	$0,0093 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3

Позначення на рисунках

Напрямок теплового потоку:						
—	неіржавна сталь → сплав алюмінію ($q > 0$)	○	повітря	$m = 10^{-3} \text{ г}$		
- -	сплав алюмінію → неіржавна сталь ($q < 0$)	●	аргон			
		▼	гелій			
△	повітря	$p_g = 0$ (нехтування механічним впливом газу на контакт тіл)		×	криптон	
▲	аргон			□	повітря	$m = 10^{-2} \text{ г}$
▽	гелій			■	аргон	

У табл. 3 наведено позначення, які використовуються на рисунках.

На рис. 2 зображено залежність півширини зазору a від інтенсивності зовнішнього тиску p , коли в зазорі міститься повітря або аргон. Збільшення інтенсивності тиску p зумовлює зменшення півширини зазору a як у випадку теплового потоку, скерованого від неіржавної сталі до сплаву алюмінію, так і у випадку теплового потоку, скерованого від сплаву алюмінію до неіржавної сталі. За фіксованого p півширина зазору a зростає зі збільшенням маси газу m для двох напрямів теплового потоку. Якщо p та m залишаються сталими, а тепловий потік скерований до неіржавної сталі, то зміна його напрямку на протилежний спричиняє зменшення a . Порівнюючи криві, які відповідають розв'язку задачі, побудованому за припущення про неістотний механічний вплив газу (криві для $p_g = 0$), із кривими, які відповідають розв'язку задачі, побудованому з урахуванням механічного впливу газу (криві для $m > 0$), можна зробити такий висновок: за фіксованого p ширина зазору при $p_g = 0$ є меншою від ширини зазору при $m > 0$.

Рис. 3 ілюструє залежність температури газу T_g від інтенсивності тиску p . Зі збільшенням p та зменшенням m температура газу зростає за теплового потоку до неіржавної сталі та спадає за теплового потоку до сплаву алюмінію.

На рис. 4 зображено контактний термоопір $R(x)$ досліджуваної структури, коли зазор заповнює повітря, аргон або гелій. Як бачимо, максимальне значення термоопору R_{max} досягається в центральній точці зазору $x = 0$. З рисунка також видно, що для всіх трьох газів як за нехтування їх механічним впливом, так і

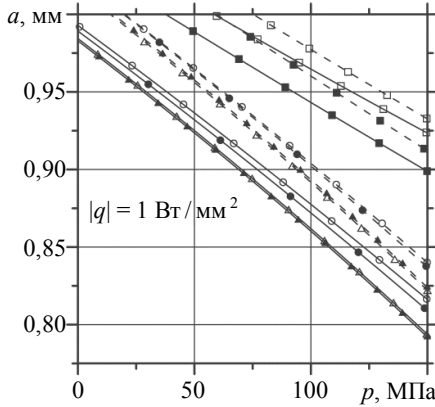


Рис. 2. Залежність півширини зазору від інтенсивності зовнішнього тиску

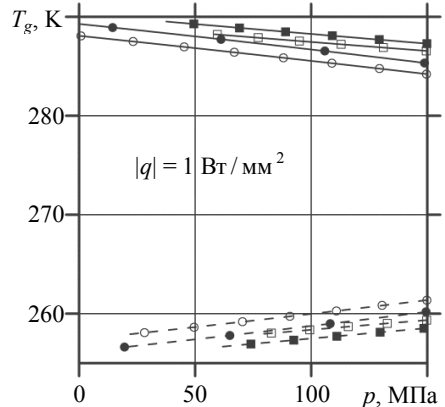


Рис. 3. Залежність температури газу від інтенсивності зовнішнього тиску

з його урахуванням, контактний термоопір є завжди більшим у випадку теплового потоку від сплаву алюмінію до неіржавної сталі.

Рис. 5 ілюструє залежність максимального контактного термоопору тіл R_{max} від інтенсивності прикладеного тиску p , коли міжконтактним газом є повітря або аргон. Збільшення p зумовлює зменшення R_{max} . Максимальний контактний термоопір тіл, розрахований на основі розв'язку задачі, де нехтується механічним впливом газу (криві для $p_g = 0$), істотно відрізняється від максимального контактного термоопору тіл, розрахованого на основі розв'язку задачі, де враховується механічний вплив газу (криві для $m > 0$). Зокрема, коли зазор заповнений повітрям і $p = 100$ МПа, контактний термоопір при $m = 10^{-3}$ й $m = 10^{-2}$ перевищує контактний термоопір при $p_g = 0$ в 1,06 і 1,41 раз відповідно, якщо тепловий потік скерований від неіржавної сталі до сплаву алюмінію,

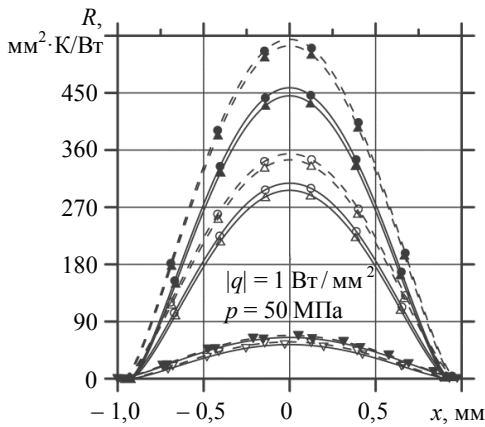


Рис. 4. Контактний термоопір

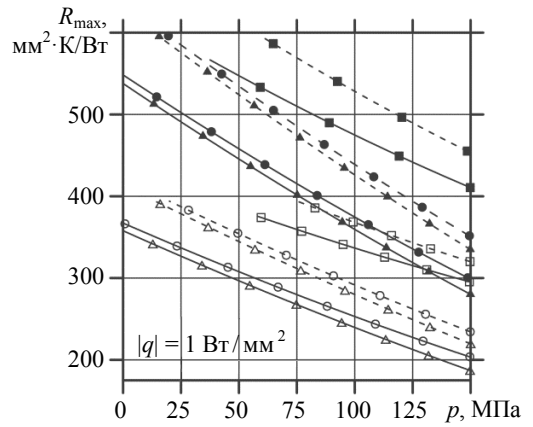


Рис. 5. Залежність максимального контактного термоопору від інтенсивності зовнішнього тиску

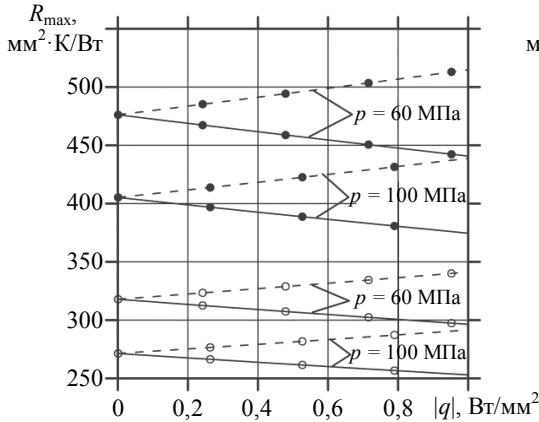


Рис. 6. Залежність максимального контактного термоопору від модуля густини теплового потоку

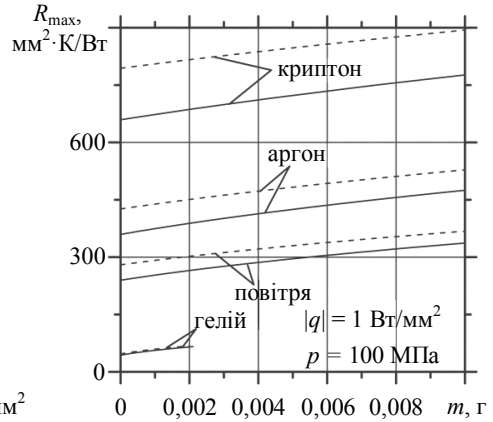


Рис. 7. Залежність максимального контактного термоопору від маси газу

та в 1,04 і 1,31 раз відповідно, якщо тепловий потік має протилежний напрям. Коли зазор заповнений аргоном і $p = 100$ МПа, контактний термоопір при $m = 10^{-3}$ й $m = 10^{-2}$ перевищує контактний термоопір при $p_g = 0$ в 1,04 і 1,32 раз відповідно, якщо тепловий потік скерований від неіржавної сталі до сплаву алюмінію, та в 1,03 і 1,24 раз відповідно, якщо тепловий потік має протилежний напрям.

Із ростом модуля густини теплового потоку $|q|$ максимальний контактний термоопір тіл R_{\max} зменшується, якщо тепловий потік напрямлений до сплаву алюмінію, та збільшується, якщо тепловий потік напрямлений до неіржавної сталі (рис. 6). Збільшення маси газу m (а, отже, і його тиску p_g) призводить до збільшення R_{\max} для двох напрямів теплового потоку (рис. 7). За фіксованого m R_{\max} є найбільшим у разі наявності в зазорі кріптон (кріптон має найменший коефіцієнт теплопровідності серед газів, вибраних для цієї роботи), та найменшим, якщо зазор заповнений гелієм (гелій має найбільший коефіцієнт теплопровідності серед газів, вибраних для цієї роботи).

З метою оцінки рівня термічної ректифікації введемо параметр (показник термічної ректифікації) [33] $\varepsilon = \left(R_{\max}^{Al \rightarrow SS} - R_{\max}^{SS \rightarrow Al} \right) / R_{\max}^{Al \rightarrow SS} \cdot 100\%$, де $R_{\max}^{Al \rightarrow SS}$ — максимальне значення контактного термоопору, коли тепловий потік напрямлений від сплаву алюмінію до неіржавної сталі; $R_{\max}^{SS \rightarrow Al}$ — максимальне значення контактного термоопору, коли тепловий потік напрямлений від неіржавної сталі до сплаву алюмінію.

На рис. 8 і 9 зображено залежність показника термічної ректифікації ε від модуля густини теплового потоку $|q|$ і маси газу m відповідно. Як бачимо, рівень термічної ректифікації зростає зі збільшенням модуля густини теплового потоку та спадає зі збільшенням маси газу. Рівень термічної ректифікації є найвищим, коли міжконтактним газом є кріптон, та найнижчим, коли в зазорі міститься гелій.

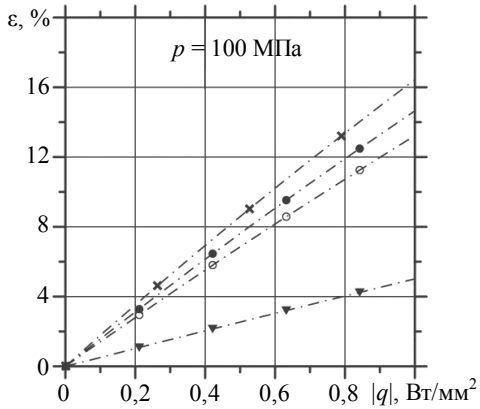


Рис. 8. Залежність показника термічної ректифікації від модуля густини теплового потоку

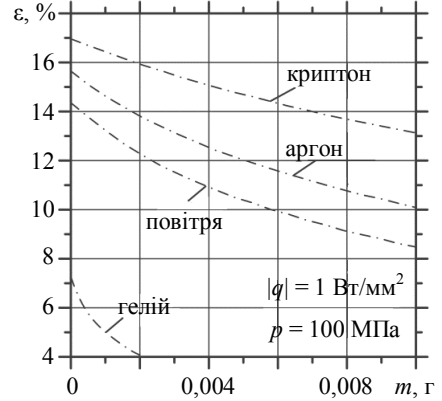


Рис. 9. Залежність показника термічної ректифікації від маси газу

Висновки. Досліджено термопружний контакт двох півбезмежних тіл з різних матеріалів за наявності газу в зазорі, зумовленого виїмкою малої висоти на поверхні одного з тіл, під дією стискальних однорідних зусиль і стаціонарного теплового потоку. Припускається, що міжконтактний газ є ідеальним і його стан описує рівняння Клапейрона-Менделєєва. Для розрахунку температури газу запропоновано співвідношення, яке пов'язує її з температурами поверхонь зазору. Враховано вплив пружних деформацій, зумовлених зовнішнім тиском і тиском газу, та термічних деформацій, спричинених тепловим потоком, на деформування зазору і контактний термоопір тіл. Контактну задачу зведено до системи двох нелінійних сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь щодо висоти зазору та стрибка температури між його поверхнями, розв'язок якої побудовано із застосуванням методу послідовних наближень. Для знаходження тиску газу використано рівняння Клапейрона-Менделєєва.

Числові обчислення проведено для пари матеріалів неіржавна сталь AISI 304 – сплав алюмінію А380 за наявності в зазорі повітря, аргону, криптону або гелію. Розглянуто два протилежних напрями теплового потоку: від неіржавної сталі до сплаву алюмінію та від сплаву алюмінію до неіржавної сталі. Проаналізовано вплив маси газу, густини теплового потоку й інтенсивності зовнішнього тиску на ширину зазору, температуру газу, контактний термоопір тіл і рівень термічної ректифікації. Проведено порівняння контактного термоопору тіл за нехтування механічним впливом міжконтактного газу (тиск газу вважається рівним нулю) з контактним термоопором тіл за врахування цього впливу (маса та тиск газу є ненульовими). Встановлено, що:

- збільшення інтенсивності зовнішнього тиску та зменшення маси газу зумовлює зменшення ширини зазору і максимального контактного термоопору тіл для двох напрямів теплового потоку;

- якщо тепловий потік скерований від сплаву алюмінію до неіржавної сталі, то зміна його напрямку на протилежний спричиняє зменшення ширини зазору та контактного термоопору тіл;
- максимальний контактний термоопір досліджуваної структури, розрахований на основі розв'язку задачі, де враховано механічний вплив газу, значно перевищує максимальний контактний термоопір досліджуваної структури, розрахований на основі розв'язку задачі, де знехтувано цим впливом;
- рівень термічної ректифікації зростає зі збільшенням модуля густини теплового потоку та спадає зі збільшенням маси газу;
- рівень термічної ректифікації є найвищим, якщо зазор заповнено криптоном, та найнижчим, якщо в зазорі міститься гелій.

Роботу виконано за підтримки Національної академії наук України (проект НДР молодих учених НАН України у 2015 р., договір ВБМ-416).

Література

- [1] *Kuznetsov Ye. A.* Effect of fluid lubricant on the contact characteristics of rough elastic bodies in compression // *Wear*. — 1985. — Vol. 102, No 3. — P. 177-194.
- [2] *Мартиняк Р. М.* Контакт півпростору з нерівною основою при заповненому ідеальним газом міжконтактному зазорі // *Мат. методи та фіз.-мех. поля*. — 1998. — Т. 41, № 4. — С. 144-149.
- [3] *Горячева И. Г., Маховская Ю. Ю.* Контактное взаимодействие упругих тел при наличии капиллярной адгезии // *Прикл. математика и механика*. — 1999. — Т. 63, № 1. — С. 128-137.
- [4] *Горячева И. Г., Маховская Ю. Ю.* Адгезионное взаимодействие упругих тел // *Прикл. математика и механика*. — 2001. — Т. 65, № 2. — С. 279-289.
- [5] *Кит Г. С., Мартыняк Р. М., Мачишин И. М.* Влияние газожидкостного заполнителя межконтактного пространства на напряженное состояние сопряженных тел // *Прикл. механика*. — 2003. — Т. 39, №3. — С. 52-60.
- [6] *Мартиняк Р. М., Слободян Б. С.* Взаємодія двох тіл за наявності капілярів у міжконтактному зазорі // *Мат. методи та фіз.-мех. поля*. — 2006. — Т. 49, № 1 — С. 164-173.
- [7] *Мартиняк Р. М., Слободян Б. С.* Контакт пружних півпросторів за наявності між ними еліптичного зазору з рідиною // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 62-66.
- [8] *Амирджанян А. А., Саакян А. В.* О вдавливания жёсткого штампа с вогнутым основанием в упругую полуплоскость с учётом влияния наполнителя в каверне // *Изв. НАН Армении. Серия: Механика*. — 2012. — Т. 65, № 1. — С. 7-16.
- [9] *Слободян Б. С., Чижик С. А., Мартиняк Р. М.* Контактна взаємодія тіл за наявності в міжповерхневому зазорі ідеального газу та рідинних містків // *Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології*. — 2013. — Вип. 18. — С. 189-197.
- [10] *Козачок О. П., Слободян Б. С., Мартыняк Р. М.* Взаимодействие упругих тел с периодическим рельефом при наличии жидкостных мостиков в межконтактных зазорах // *Теор. и прикл. механика*. — 2013. — Вып. 7 (53). — С. 45-52.
- [11] *Козачок О. П., Слободян Б. С., Мартиняк Р. М.* Взаємодія двох пружних тіл за наявності між ними періодично розташованих зазорів, заповнених реальним газом // *Мат. методи та фіз.-мех. поля*. — 2015. — Т. 58, № 1. — С. 103-111.
- [12] *Fenech H., Rohsenow W. M.* Prediction of thermal conductance of metallic surfaces in contact // *ASME J. Heat Transf.* — 1963. — Vol. 85, No 1. — P. 15-24.
- [13] Effects of interface gases on contact conductance / *A. Mentès, T. N. Veziroglu, R. Samudrala, J. W. Sheffield, A. Williams* // *AIAA Paper No 81-0214*. — 1981 — P. 1-7.
- [14] *Das A. K., Sadhal S. S.* Analytical solution for constriction resistance with interstitial fluid in the gap // *Heat Mass Transf.* — 1998. — Vol. 34, No 2-3. — P. 111-119.

- [15] *Shaik R. A., Beall A. N., Razani A.* Thermal modeling of the effect of interstitial fluid on contact resistance between two dissimilar materials // *Heat Transf. Eng.* — 2001. — Vol. 22, No 1. — P. 41-50.
- [16] *Мартиняк Р. М., Чумак К. А.* Термопружний контакт півпросторів, що мають однакові термічні дистортивності, за наявності теплопровидного міжповерхневого просвіту // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2008. — Т. 51, № 3. — С. 163-175.
- [17] *Мартиняк Р. М., Чумак К. А.* Термопружне розшарування тіл за наявності теплопровидного заповнювача міжконтактного просвіту // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 45-52.
- [18] *Martynyak R., Chumak K.* Effect of heat-conductive filler of interface gap on thermoelastic contact of solids // *Int. J. Heat Mass Transf.* — 2012. — Vol. 55, No 4. — P. 1170-1178.
- [19] *Чумак К. А., Мартиняк Р. М.* Термопружна взаємодія тіл з регулярною текстурою поверхонь за наявності теплопровидного середовища в міжконтактних зазорах // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2013. — Т. 56, № 1. — С. 52-61.
- [20] *Чумак К.* Ефект напрямленості теплового потоку у разі заповненого теплопровидним середовищем зазору на межі двох тіл // *Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології.* — 2013. — Вип. 17. — С. 219-225.
- [21] *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 // *Int. J. Mech. Sci.* — 2014. — Vol. 84. — P. 138-146.
- [22] *Yovanovich M. M.* Apparent conductivity of glass microspheres from atmospheric pressure to vacuum // *ASME Paper No 73-HT-43.* — 1973. — P. 1-9.
- [23] *Yovanovich M. M., Kitscha W. W.* Modeling the effect of air and oil upon the thermal resistance of a sphere-flat contact // *AIAA Paper No 73-746.* — 1973. — P. 1-12.
- [24] *Bahrami M., Yovanovich M. M., Culham J. R.* Thermal joint resistances of conforming rough surfaces with gas-filled gaps // *J. Thermophys. Heat Transf.* — 2004. — Vol. 18, No 3. — P. 318-325.
- [25] *Bahrami M., Yovanovich M. M., Culham J. R.* Thermal joint resistances of nonconforming rough surfaces with gas-filled gaps // *J. Thermophys. Heat Transf.* — 2004. — Vol. 18, No 3. — P. 326-332.
- [26] *Slobodian B., Chumak K., Martynyak R.* Mechanical and thermal effect of a filler of intercontact gaps on contact between two semi-infinite solids with microtextured surfaces // *Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології.* — 2013. — Вип. 17. — С. 168-174.
- [27] *Barber J. R.* The effect of thermal distortion on constriction resistance // *Int. J. Heat Mass Transf.* — 1971. — Vol. 14, No 6. — P. 751-766.
- [28] *Dundurs J., Panek C.* Heat conduction between bodies with wavy surfaces // *Int. J. Heat Mass Transf.* — 1976. — Vol. 19, No 7. — P. 731-736.
- [29] *Stevenson P. F., Peterson G. P., Fletcher L. S.* Thermal rectification in similar and dissimilar metal contacts // *ASME J. Heat Transf.* — 1991. — Vol. 113, No 1. — P. 30-36.
- [30] *Kharitonov V. V., Yakutin N. V.* Contact heat transfer between dissimilar materials // *Tech. Phys.* — 1997. — Vol. 42, No 2. — P. 125-129.
- [31] *Chumak K., Martynyak R.* Thermal rectification between two thermoelastic solids with a periodic array of rough zones at the interface // *Int. J. Heat Mass Transf.* — 2012. — Vol. 55, No. 21-22. — P. 5603-5608.
- [32] *O'Callaghan P. W., Probert S. D., Jones A.* A thermal rectifier // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1970. — Vol. 3, No 9. — P. 1352-1358.
- [33] *Madhusudana C. V.* Thermal contact conduction and rectification at low joint pressures // *Int. Comm. Heat Mass Transfer.* — 1993. — Vol. 20, No 1. — P. 123-132.
- [34] *Engineering properties of steel; Editor: Ph. D. Harvey.* — American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA, 1982. — 620 p.
- [35] *NADCA Product Specification Standards for Die Casting, 9th Edition.* — North American Die Casting Association, Arlington Heights, Illinois, USA, 2015. — 272 p.
- [36] *CRC handbook of engineering tables; Editor: R. C. Dorf.* — CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2003. — 656 p.

Thermoelastic interaction of bodies with allowance for thermal resistance and pressure of an ideal gas in an intercontact gap

Kostyantyn Chumak, Bogdan Slobodian, Nataliya Malanchuk

The thermoelastic contact of two semi-infinite bodies of heterogeneous materials in the presence of gas in a gap, which is caused by a groove of a small height on the surface of one of the bodies, is investigated. The gas exerts a pressure on the gap surfaces and causes an additional thermal resistance dependent on the gap height. As a mathematical model of the gas, the ideal gas is chosen, which state is described by the Clapeyron-Mendeleev equation. The effect of the gas pressure, the mechanical and thermal load on the gap deforming is taken into account. The contact problem formulated is reduced to a system of two nonlinear singular integrodifferential equations for the gap height and the temperature jump between the gap surfaces. Its solution is constructed using the method of successive approximations. To find the gas pressure, the Clapeyron-Mendeleev equation, in which the dependence of the gas temperature on the temperatures of the gap surfaces is taken into account, is used. Numerical calculations are carried out for the pair of materials of stainless AISI 304 steel — A380 aluminum alloy in the presence of air, argon, krypton or helium in the gap. The influence of the gas mass, the heat flow density, and the external pressure intensity on the gap width, the gas temperature, the thermal contact resistance between the bodies as well as the level of thermal rectification is analyzed.

Термоупругое взаимодействие тел с учетом термосопротивления и давления идеального газа в межконтактном зазоре

Константин Чумак, Богдан Слободян, Наталия Маланчук

Исследовано термоупругий контакт двух полубесконечных тел с различных материалов при наличии газа в зазоре, обусловленном выемкой малой высоты на поверхности одного из тел. Газ оказывает равномерное давление на поверхности зазора и создает дополнительное термосопротивление, которое зависит от высоты зазора. В качестве математической модели газа выбрано идеальный газ, состояние которого описывает уравнение Клапейрона-Менделеева. Учтено влияние давления газа, силовой и тепловой нагрузки на деформирование зазора. Сформулированную контактную задачу сведено к системе двух нелинейных сингулярных интегро-дифференциальных уравнений относительно высоты зазора и скачка температуры между его поверхностями, решение которой построено с применением метода последовательных приближений. Для нахождения давления газа использовано уравнение Клапейрона-Менделеева, в котором учтено зависимость температуры газа от температур поверхностей зазора. Числовые расчеты проведено для пары материалов нержавеющая сталь AISI 304 — сплав алюминия A380 при наличии в зазоре воздуха, аргона, криптона или гелия. Проанализировано влияние массы газа, плотности теплового потока и интенсивности внешнего давления на ширину зазора, температуру газа, контактное термосопротивление тел и уровень термической ректификации.

Представлено доктором фізико-математичних наук Р. Мартиняком

Отримано 10.12.15