

Ефект напрямленості теплового потоку у разі заповненого теплопроникним середовищем зазору на межі двох тіл

Костянтин Чумак

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

Ефект напрямленості теплового потоку або термічна ректифікація полягає у кількісній зміні контактного термоопору пари тіл із різних матеріалів за зміни напрямку теплового потоку на протилежний. У роботі на основі розв'язку відповідної контактної задачі термопружності це явище досліджено для випадку взаємодії двох півпросторів за наявності між їх поверхнями локального зазору, який містить теплопроникне середовище. Проаналізовано вплив коефіцієнта теплопровідності заповнювача, інтенсивності силового навантаження, густини теплового потоку та відношення термічних дистортивностей тіл на термічну ректифікацію між ними.

Ключові слова: ефект напрямленості теплового потоку, термічна ректифікація, термоопір, міжконтактний зазор, теплопроникне середовище.

Вступ. У теорії контактного теплообміну звичайно вважають, що тепловий потік не впливає на контактний термоопір тіл, оскільки кількість і розмір ділянок контакту визначається контактними зусиллями, які є незалежними від теплового навантаження [1-3]. Проте термічне деформування спряжених тіл, яке зумовлене прикладеним тепловим потоком, може істотно вплинути на розмір ділянок контакту, а, отже, і на величину контактного термоопору. Окрім того, експериментально показано [4-7], що термоопір контакту тіл кількісно залежить не лише від величини теплового потоку, але й від його напрямку. Цей феномен у науці прийнято називати ефектом напрямленості теплового потоку або термічною ректифікацією.

Існує декілька теорій щодо механізмів, які зумовлюють ефект напрямленості теплового потоку [8]. Однією з найбільш обґрунтованих є теорія, яка в основу явища термічної ректифікації покладає зумовлену термічними деформаціями зміну фактичної площі контакту [5, 9]. Теоретичне дослідження термічної ректифікації з позицій цієї теорії вимагає розв'язування відповідних задач теплопровідності та термопружності.

Експериментальні результати [10-12] показують, що у сучасних приладах і конструкціях термічна провідність через середовище у зазорах між тілами може бути домінуючим способом теплопередачі. При цьому термоопір зазорів, а не термоопір фактичних місць контакту, має визначальний вплив на рівень термічної ректифікації. Незважаючи на це, теоретичні дослідження ефекту напрямленості теплового потоку проведені лише за припущення про теплоізоляцію міжконтактних

зазорів, тобто відсутності в них будь-якого середовища [13-16]. Ця робота стосується вивчення термічної ректифікації у разі контакту двох півпросторів, на інтерфейсі між якими знаходиться зазор малої висоти, з урахуванням впливу теплопровідності середовища в зазорі та є продовженням і узагальненням робіт [17-19].

1. Формулювання контактної задачі

Розглянемо взаємодію двох пружних ізотропних півпросторів S_1 і S_2 , матеріали яких мають різні модулі Юнга E_1, E_2 , коефіцієнти Пуассона ν_1, ν_2 , коефіцієнти лінійного теплового розширення α_1, α_2 та коефіцієнти теплопровідності λ_1, λ_2 (рис. 1а). Поверхня нижнього тіла є ідеально плоскою, а поверхня іншого вздовж нескінченної смуги $x \in [-b, b]$ має плитку положу виїмку (рис. 1а), форма якої описується функцією $r(x) = r_0 \left(1 - x^2/b^2\right)^{3/2}$, $r_0 \ll b$. Тіла контактують під дією заданих на нескінченності стискальних однорідних зусиль p та стаціонарного теплового потоку q , нормальних до поверхні розмежування.

Вважаючи, що в тілах реалізується двовимірне поле температури та стан плоскої деформації, розглядатимемо взаємодію двох півплощин D_1 і D_2 , утворених перетином тіл координатною площиною Oxy (рис. 1б). Внаслідок початкової нерівності межі одного з тіл між їх поверхнями утвориться зазор, висота $h(x)$ і довжина $2a$ ($a < b$) якого наперед невідомі та залежать від прикладеного термо-механічного навантаження. Зазор містить теплопроникне середовище (газ, рідину) з коефіцієнтом теплопровідності λ_0 , яке не чинить тиску на поверхні тіл. Його вплив на контактний теплообмін моделюватимемо термоопором [17-19]:

$$R(x) = h(x)/\lambda_0. \tag{1}$$

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

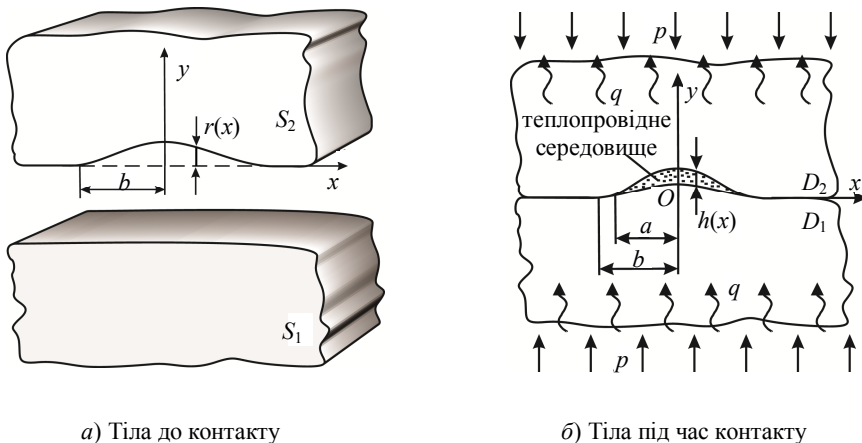


Рис. 1

$$\gamma(x) = T^-(x, 0) - T^+(x, 0), \quad |x| < a. \quad (2)$$

Тут T — температура, а індексами «+» і «-» позначено її граничні значення на осі x у верхній і нижній півплощинах.

На ділянках налягання поверхонь тіл сили тертя відсутні, а тепловий контакт є ідеальним.

2. Система сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь задачі

У роботі [18] із використанням методу функцій міжконтактних зазорів [20] сформульовану контактну задачу було зведено до системи двох нелінійних сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь відносно висоти зазору $h(x)$ і стрибка температури між його поверхнями $\gamma(x)$:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-a}^a \frac{h'(t)}{t-x} dt + \frac{\lambda_{12}}{2} (\delta_2 - \delta_1) \gamma(x) = \frac{3r_0}{b} \left(\frac{x^2}{b^2} - \frac{1}{2} \right) + \frac{Kp^\infty}{2}, \quad |x| < a; \quad (3)$$

$$\lambda_0 \frac{\gamma(x)}{h(x)} - \frac{\lambda_{12}}{2\pi} \int_{-a}^a \frac{\gamma'(t)}{t-x} dt = q^\infty, \quad |x| < a, \quad (4)$$

де $\lambda_{12} = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$, $K = 4(1 - \nu_1^2)/E_1 + 4(1 - \nu_2^2)/E_2$, $\delta_j = \alpha_j(1 + \nu_j)/\lambda_j$ — термічна дистортивність (ТД) матеріалу, яка характеризує зміну кривини початково прямолінійного елемента, зумовлену перпендикулярним до нього стаціонарним тепловим потоком одиничної інтенсивності.

Якщо ТД матеріалів півплощин рівні ($\delta_1 = \delta_2$), то у рівняння (3) не входить стрибок температури $\gamma(x)$ (температура не впливає на висоту зазору) та рівняння (3) і (4) розв'язуються по чергово. Розв'язок системи (3), (4) для випадку рівних ТД отримано у праці [17].

У разі різних ТД матеріалів кожне з рівнянь системи (3), (4) містить дві шукані функції $h(x)$ і $\gamma(x)$, причому в друге рівняння системи входить відношення цих функцій. Тому система рівнянь (3), (4) є функціонально нелінійною, що, враховуючи невідому довжину зазору $2a$, робить неможливим побудову її аналітичного розв'язку. У роботі [18] запропоновано аналітико-числову методику розв'язування системи рівнянь (3), (4) для випадку, коли тепловий потік напрямлений від матеріалу з меншою ТД до матеріалу з більшою ТД, а у праці [19] — для протилежного напрямку теплового потоку (від матеріалу з більшою ТД до матеріалу з меншою ТД), та вивчено контактну поведінку системи для відповідного напрямку теплового потоку.

Нижче, використавши отримані у роботах [17-19] розв'язки системи рівнянь (3), (4), проаналізуємо вплив напрямку теплового потоку на термоопір зазору, який у рамках сформульованої задачі є контактним термоопором розглянутої структури.

3. Аналіз ефекту напрямленості теплового потоку

Не обмежуючи загальності, надалі вважатимемо, що $\delta_2 < \delta_1$, тобто ТД верхньої півплощини D_2 є меншою, ніж ТД нижньої півплощини D_1 . За такого припущення алгебраїчний знак густини теплового потоку q вказує на його напрям: знак плюс означає, що тепловий потік напрямлений до матеріалу з меншою ТД (у напрямку осі Oy); знак мінус означає, що тепловий потік напрямлений до матеріалу з більшою ТД (протилежно до напрямку осі Oy).

Для ілюстрації результатів введено безрозмірні величини: координату $\tilde{x} = x/d$, максимальну висоту виїмки $\tilde{r} = r/b = 0,001$, термоопір зазору $\tilde{R}(\tilde{x}) = \lambda_{12} h(x)/(b\lambda_0)$, інтенсивність силового навантаження $\tilde{p} = Kp$, густину теплового потоку $\tilde{q} = b\lambda_{12}q$, коефіцієнт теплопровідності заповнювача $\tilde{\lambda}_0 = \lambda_0/\lambda_{12}$.

На рис. 2 зображено розподіл термоопору зазору для двох напрямів теплового потоку з фіксованою за абсолютним значенням густиною $|\tilde{q}| = 0,01$ і різної інтенсивності силового навантаження ($\tilde{q} = 0,01, \tilde{p} = 0,0015$; $\tilde{q} = 0,01, \tilde{p} = 0,002$; $\tilde{q} = -0,01, \tilde{p} = 0,0015$; $\tilde{q} = -0,01, \tilde{p} = 0,002$ криві 1-4 відповідно), де $\tilde{\lambda}_0 = 0,005$, $\delta_2/\delta_1 = 0,5$. З аналізу проведених досліджень випливає, що за фіксованої інтенсивності силового навантаження термоопір зазору для напрямку теплового потоку до тіла з більшою ТД є більшим, ніж термоопір зазору для напрямку теплового потоку до тіла з меншою ТД (наприклад, криві 1 і 3). Це означає, що у разі заповненого теплопроникним середовищем зазору проявляється ефект напрямленості теплового потоку. З метою оцінки рівня термічної ректифікації введемо параметр $\varepsilon(\%) = (R_{2 \rightarrow 1} - R_{1 \rightarrow 2})/R_{2 \rightarrow 1} \cdot 100$, де $R_{1 \rightarrow 2}$ — максимальне значення термоопору зазору, коли тепловий потік напрямлений від тіла S_1 до тіла S_2 (до матеріалу з меншою ТД); $R_{2 \rightarrow 1}$ — максимальне значення термоопору зазору, коли тепловий потік напрямлений від тіла S_2 до тіла S_1 (до матеріалу з більшою ТД). Результати досліджень такі: $\varepsilon = 41,27\%$, якщо $\tilde{p} = 0,0015$; $\varepsilon = 36,68\%$, якщо

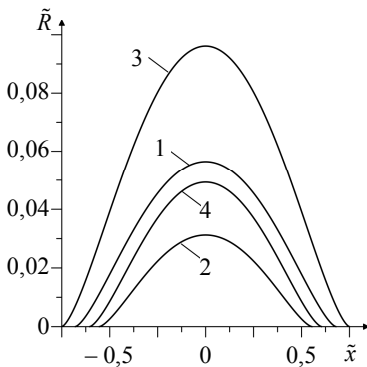


Рис. 2. Розподіл термоопору зазору для двох напрямів теплового потоку та різної інтенсивності силового навантаження

$\tilde{p} = 0,002$, тобто зменшення інтенсивності силового навантаження зумовлює підвищення рівня термічної ректифікації.

На рис. 3 відображено вплив густини теплового потоку на ефект напрямленості теплового потоку для $\tilde{p} = 0,002; \tilde{\lambda}_0 = 0,005$; $\delta_2/\delta_1 = 0,5$ ($\tilde{q} = 0,01; \tilde{q} = 0,02$; $\tilde{q} = -0,01$; $\tilde{q} = -0,02$ криві 1-4 відповідно). Якщо тепловий потік напрямлений до тіла з більшою ТД, то термоопір зазору зростає зі збільшенням \tilde{q} . У разі протилежного напрямку теплового потоку термоопір зазору спадає зі збільшенням \tilde{q} . Оскільки

$\varepsilon = 36,68\%$ для $|\tilde{q}| = 0,01$ та $\varepsilon = 61,98\%$ для $|\tilde{q}| = 0,02$, то ефект напрямленості теплового потоку сильніше проявляється зі збільшенням густини теплового потоку.

Криві на рис. 4 відображають розподіл термоопору зазору за різних значень коефіцієнта теплопровідності заповнювача для двох напрямів теплового потоку ($\tilde{q} = 0,01$, $\tilde{\lambda}_0 = 0,005$; $\tilde{q} = 0,01$, $\tilde{\lambda}_0 = 0,007$; $\tilde{q} = -0,01$, $\tilde{\lambda}_0 = 0,005$; $\tilde{q} = -0,01$, $\tilde{\lambda}_0 = 0,007$ криві 1-4 відповідно), де $\tilde{p} = 0,002$, $\delta_2/\delta_1 = 0,5$. Отже, чим краще проводить теплоту середовище в зазорі, тим більший/менший опір теплопередачі створює зазор у разі напрямку теплового потоку до тіла з більшою/меншою ТД. Зокрема, $\varepsilon = 36,68\%$ для $\tilde{\lambda}_0 = 0,005$ та $\varepsilon = 27,72\%$ для $\tilde{\lambda}_0 = 0,007$, тобто зменшення коефіцієнта теплопровідності міжконтактного середовища зумовлює підвищення рівня термічної ректифікації.

Вплив відношення термічних дистортивностей матеріалів тіл на ефект напрямленості теплового потоку ($\tilde{q} = 0,01$, $\delta_2/\delta_1 = 0,5$; $\tilde{q} = 0,01$, $\delta_2/\delta_1 = 0,8$; $\tilde{q} = -0,01$, $\delta_2/\delta_1 = 0,5$; $\tilde{q} = -0,01$, $\delta_2/\delta_1 = 0,8$; $\delta_2/\delta_1 = 1$ криві 1-5 відповідно), де $\tilde{p} = 0,002$, $\tilde{\lambda}_0 = 0,005$, відображено на рис. 5. Тут крива 5 відповідає випадку, коли термічні дистортивності тіл є рівні, а, отже, прикладений тепловий потік не впливає на висоту зазору. У випадку теплового потоку до тіла з більшою/меншою ТД термоопір зазору є більшим/меншим відповідно за термоопір зазору, який виникає за рівності термічних дистортивностей тіл. Виявлено, що збільшення відношення δ_2/δ_1 в 1,6 раза викликає зменшення рівня термічної ректифікації більш, ніж удвічі ($\varepsilon = 36,68\%$, якщо $\delta_2/\delta_1 = 0,5$, та $\varepsilon = 16,67\%$, якщо $\delta_2/\delta_1 = 0,8$).

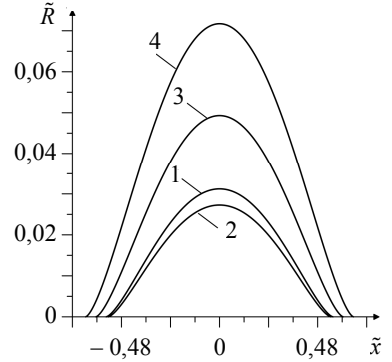


Рис. 3. Вплив густини теплового потоку на термічну ректифікацію

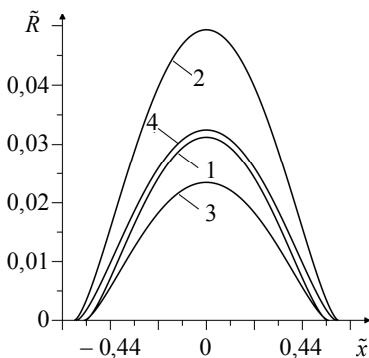


Рис. 4. Вплив теплопровідності заповнювача зазору на термічну ректифікацію

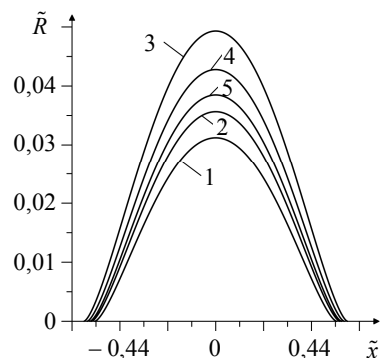


Рис. 5. Вплив відношення термічних дистортивностей тіл на термічну ректифікацію

Висновки. На основі отриманого в попередніх роботах розв'язку контактної задачі термопружності про взаємодію двох півпросторів за наявності на інтерфейсі заповненого теплопроникним середовищем зазору проаналізовано термоопір зазору для двох напрямів прикладеного теплового потоку — від матеріалу з меншою термічною дистортивністю до матеріалу з більшою термічною дистортивністю та у зворотному напрямі. Виявлено, що термоопір зазору істотно залежить від напрямку теплового потоку, тобто проявляється ефект напрямленості теплового потоку (термічна ректифікація). Проаналізовано вплив коефіцієнта теплопровідності заповнювача, інтенсивності силового навантаження, густини теплового потоку та відношення термічних дистортивностей тіл на термічну ректифікацію між ними. Виявлено, що зменшення коефіцієнта теплопровідності міжконтактного середовища, інтенсивності силового навантаження та відношення термічних дистортивностей тіл викликає підвищення рівня термічної ректифікації, в той час як зменшення густини теплового потоку зумовлює його зниження.

Література

- [1] Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. — Москва: Энергия, 1977. — 328 с.
- [2] Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. — Москва: Энергия, 1971. — 216 с.
- [3] Madhusudana C. V., Fletcher L. S. Contact heat transfer – the last decade // AIAA J. — 1986. — Vol. 24, No 3. — P. 510-523.
- [4] Barzelay M. E., Tong K. N., Holloway G. F. Effect of pressure on thermal conductance of joints // NASA Technical Note 3295. — 1955. — 53 p.
- [5] Clausing A. M. Heat transfer at the interface of dissimilar metals - the influence of thermal strain // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1966. — Vol. 9, No 8. — P. 791-801.
- [6] Thomas T. R., Probert S. D. Thermal contact resistance: the directional effect and other problems // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1970. — Vol. 13, No 5. — P. 789-807.
- [7] Stevenson P. F., Peterson G. P., Fletcher L. S. Thermal rectification in similar and dissimilar metal contacts // ASME J. Heat Transfer. — 1991. — Vol. 113, No 1. — P. 30-36.
- [8] Roberts N. A., Walker D. G. A review of thermal rectification observations and models in solid materials // Int. J. Therm. Sci. — 2011. — Vol. 50, No 5. — P. 648-662.
- [9] Barber J. R. The effect of thermal distortion on constriction resistance // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1971. — Vol. 14, No 6. — P. 751-766.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Misra P., Nagaraju J. Thermal gap conductance at low contact pressures (<1 MPa): effect of gold plating and plating thickness // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2010. — Vol. 53, No 23-24. — P. 5373-5379.
- [13] Dundurs J., Panek C. Heat conduction between bodies with wavy surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1976. — Vol. 19, No 7. — P. 731-736.
- [14] Comninou M., J. R. Barber J. R. The thermoelastic Hertz problem with pressure dependent contact resistance // Int. J. Mech. Sci. — 1984. — Vol. 26, No 11-12. — P. 549-554.
- [15] Kharitonov V. V., Yakutin N. V. Contact heat transfer between dissimilar materials // Tech. Phys. — 1997. — Vol. 42, No 2. — P. 125-129.
- [16] Chumak K. A., Martynyak R. M. Thermal rectification between two thermoelastic solids with a periodic array of rough zones at the interface // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2012. — Vol. 55, No 21-22. — P. 5603-5608.

- [17] *Мартиняк Р. М., Чумак К. А.* Термопружний контакт півпросторів, що мають однакові термічні дистортивності, за наявності теплопроникного міжповерхневого просвіту // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2008. — Т. 51, № 3. — С. 163-175.
- [18] *Чумак К., Мартиняк Р.* Вплив теплопровідності заповнювача міжповерхневого просвіту на термопружний контакт тіл за теплового потоку, спрямованого до матеріалу з більшою термічною дистортивністю // *Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології.* — 2009. — Вип. 9. — С. 160-169.
- [19] *Martyniak R., Chumak K.* Effect of heat-conductive filler of interface gap on thermoelastic contact of solids // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2012. — Vol. 55, No 4. — P. 1170-1178.
- [20] *Мартиняк Р. М.* Метод функцій міжконтактних зазорів у задачах локального порушення контакту пружних півпросторів // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2000. — Т. 43, № 1. — С. 102-108.

Effect of heat flow direction for an interface gap filled with heat-permeable medium

Kostyantyn Chumak

Effect of heat flow direction or thermal rectification consists in quantitative change of thermal contact resistance between two solids made of dissimilar materials due to a reversal of a direction of heat flow. In the present work, based on the solution to the corresponding thermoelastic contact problem, this phenomenon was studied for the case of interaction between two half-spaces in the presence of an interface gap filled with a heat-permeable medium. The effect of thermal conductivity of the filler, load intensity, heat flow density and the ratio of thermal distortivities of the solids on thermal rectification between the solids was analyzed.

Эффект направленности теплового потока в случае заполненного теплопроницаемой средой зазора на границе двух тел

Константин Чумак

Эффект направленности теплового потока или термическая ректификация заключается в количественном изменении контактного термосопротивления пары тел из разных материалов при изменении направления теплового потока на противоположное. В настоящей работе на основании решения соответствующей контактной задачи термоупругости это явление исследовано для случая взаимодействия двух полупространств при наличии между их поверхностями локального зазора, содержащего теплопроницаемую среду. Проанализировано влияние коэффициента теплопроводности заполнителя, интенсивности силовой нагрузки, плотности теплового потока и отношения термических дистортивностей тел на термическую ректификацию между ними.

Представлено доктором фізико-математичних наук Р. Мартиняком

Отримано 05.03.13