

ЕФЕКТИВНИЙ КОНТАКТНИЙ ТЕРМОПІР РЕГУЛЯРНО ТЕКСТУРОВАНИХ ТІЛ ЗА НАЯВНОСТІ МІЖКОНТАКТНОГО ТЕПЛОПРОВІДНОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЯВИЩЕ ТЕРМІЧНОЇ РЕКТИФІКАЦІЇ

Розраховано ефективний контактний термопір пари матеріалів «неіржавна сталь AISI 304 – сплав нікелю 200» за наявності на інтерфейсі між ними періодичної системи зазорів, заповнених теплопровідним середовищем (аргоном, водою, гелієм, киснем або повітрям). У недеформованому стані поверхня неіржавної сталі AISI 304 має мікротекстурований рельєф, утворений регулярно розміщеними виїмками однакової форми, а поверхня сплаву нікелю 200 є ідеально плоскою. Оцінено рівень термічної ректифікації для такої структури за різних значень прикладених силового й теплового навантажень і максимальної висоти поверхневих виїмок.

Вступ. Експериментальні результати [17, 31, 35, 42] показують, що у сучасних приладах і конструкціях теплопровідність через середовище у зазорах між тілами може бути домінуючим способом теплопередачі. На сьогодні більшість досліджень, проведених з метою розрахунку термоопору (або оберненої до нього величини – термічної провідності) середовища, яке заповнює міжконтактні зазори, стосуються контакту двох шорстких поверхонь, коли середовищем у зазорах є газ. У низці таких досліджень реальний зазор між тілами, висота якого змінюється уздовж інтерфейсу, моделюється зазором сталої висоти (газовим прошарком), і для знаходження його термоопору R у загальному випадку використовується формула $R = \delta/\lambda_g$, де δ – ефективна висота газового прошарку, λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу. Як наслідок, проблема розрахунку термоопору заповнених газом зазорів між шорсткими поверхнями зводиться до знаходження ефективної висоти газового прошарку. Огляд запропонованих емпіричних і напівемпіричних співвідношень для її визначення наведено в працях [15, 32, 39, 42]. Серед них варто виділити запроповану у роботі [48] розрахункову формулу термічної провідності заповнених газом зазорів для шорстких тіл з нормальним (за законом Гаусса) розподілом вершин виступів шорсткості та подальші її модифікації, здійснені в працях [17, 18, 41]. Перевагами цієї формули є те, що вона враховує деформацію зазорів внаслідок прикладеного силового навантаження і дозволяє провести розрахунок їх термічної провідності для всіх режимів теплообміну через розріджений газ [43].

У працях [21, 29] здійснено теоретичні дослідження контактного термоопору з'єднань з шорсткими поверхнями з урахуванням термоопору середовища, яке заповнює зазори. Застосовувались різні методи розв'язання цієї задачі, однак з метою спрощення в обох роботах розглядалась ідеалізована модель – контакт двох циліндрів з центральною круговою ділянкою контакту і кільцевим зазором постійної висоти, який її оточує. Для переходу від ідеалізованого до реального теплового контакту запропоновано співвідношення, які пов'язують висоту зазору з параметрами реальної поверхні. Аналогічну ідеалізовану модель теплового контакту використано для теоретичного дослідження термічної провідності багатощарових листів із покриттям [34]. Термопір газу в зазорі вважався рівним відношенню постійної висоти зазору до ефективного коефіцієнта теплопровідності газу. Запропоновано співвідношення, яке пов'язує цей параметр з реальним коефіцієнтом теплопровідності газу. Таку модель теплового контакту також вибрано як розрахункову у роботі [40]. При цьому висота зазору не бралась до уваги, а термічний вплив середовища в зазорі враховувався сталою термічною провідністю. На основі розв'язку відповідної задачі теплопровідності

проведено дослідження впливу розмірів тіл і термічної провідності міжконтактного середовища на контактний термоопір з'єднання.

З використанням математичного співвідношення, яке пов'язує геометричну форму зазору з нормальним зусиллям, у роботі [49] виведено формулу для розрахунку термоопору заповненого теплопровідним середовищем зазору при контакті гладкої сфери з гладкою півплощиною. Вважалося, що висота зазору плавно змінюється від нуля (крайні точки області контакту) до значення, яке дорівнює радіусу сфери. У подальшому цю формулу застосовано для моделювання термічної провідності газу в зазорі між двома гладкими сферами [47].

У праці [26] на основі розв'язку задачі теплопровідності про контакт двох півпросторів з періодичною системою кругових у плані інтерфейсних зазорів, заповнених теплопровідним газом або рідиною, знайдено вираз для ефективного контактного термоопору розглянутої структури. Формулювання задачі не передбачало зміну ширини і висоти зазорів внаслідок силового навантаження. Середовище в зазорах розглядалось як окреме тіло, температуру якого за допомогою певного апроксимаційного співвідношення було пов'язано з температурами поверхонь тіл уздовж зазорів. Встановлено, що ефективний контактний термоопір суттєво залежить від висоти зазорів і коефіцієнта теплопровідності їх заповнювача.

У роботах [2, 4, 5] побудовано розв'язки задач теплопровідності та термопружності для тіла з тріщиною, у яких теплообмін крізь середовище в її зазорі враховано умовами неідеального теплового контакту зі сталим термоопором. Аналогічні крайові умови на берегах тріщини використано в працях [3, 9, 45, 51], проте причину термоопору в них не вказано. У роботах [2, 6] вплив заповнювача тріщини змодельовано термоопором з еліптичним законом розподілу вздовж тріщини.

У вищезгаданих дослідженнях термічної провідності зазорів, заповнених теплопровідним середовищем, вплив теплового потоку на деформування зазорів не враховувався. Однак термічне деформування спряжених тіл, яке зумовлене прикладеним тепловим потоком, може істотно вплинути на кривину поверхонь, що контактують, а отже, і на розміри міжконтактних зазорів і величину їх термоопору. Чим більшою є величина теплового потоку, тим істотнішим є вплив термічних деформацій на контактний термоопір. Тому підвищення точності розрахунку контактного термоопору з'єднань вимагає розв'язання відповідних задач термопружності з застосуванням моделей термоопору зазору, які враховують його деформацію як внаслідок силового, так і теплового навантаження. Окрім того, результати теоретичних досліджень термопружного контакту тіл з різних матеріалів у вакуумі [12, 19, 23, 27, 44], у яких враховано вплив термічних деформацій на зміну фактичної площі контакту, показали залежність контактного термоопору від напрямку теплового потоку. Цей виявлений експериментально [20, 24, 30, 31, 36–38, 44, 46] феномен відомий в науковій літературі під назвою «термічна ректифікація» або «ефект напрямленості теплового потоку». Його суть – величина ефективного контактного термоопору контактної пари змінюється при зміні напрямку теплового потоку на протилежний. У роботі [13] на основі розв'язку плоскої задачі термопружності про контакт двох півпросторів за наявності на інтерфейсі між ними одиничного зазору, заповненого теплопровідним середовищем, встановлено залежність термоопору зазору від напрямку теплового потоку. Для знаходження термоопору $R(x)$ міжконтактного середовища використано співвідношення

$$R(x) = \frac{h(x)}{\lambda_f}, \quad (1)$$

де $h(x)$ – висота зазору, яка змінюється в процесі силового і теплового навантажень, x – точка, яка лежить на лінії інтерфейсу, λ_f – коефіцієнт теплопровідності заповнювача. З використанням цієї моделі термоопору

здійснено ряд досліджень термомпружного контакту тіл з інтерфейсними зазорами [7, 8, 14, 22, 33] і термонапруженого стану біматеріалів з міжфазними тріщинами [1, 10, 11, 50] з урахуванням процесу передачі теплоти через середовище в зазорах і тріщинах.

У статті [14] побудовано аналітично-числовий розв'язок задачі термомпружності про контакт півпростору з регулярно текстурованою поверхнею і півпростору з гладкою поверхнею за наявності теплопровідного середовища в міжконтактних зазорах. При аналізі отриманих результатів автори зосередили увагу на дослідженні впливу коефіцієнта теплопровідності заповнювача зазорів і напрямку теплового потоку на локальні контактні параметри – довжину і висоту зазорів, стрибок температури між їх берегами та контактний тиск поверхонь. Нижче проведемо розрахунок ефективного контактного термоопору такої структури та дослідимо його залежність від зміни напрямку теплового потоку на протилежний (явище термічної ректифікації).

1. Модель контакту тіл. Розглянемо контакт двох півбезмежних тіл S_1 і S_2 , матеріали яких є пружними, ізотропними та різними. У недеформованому стані поверхня нижнього тіла S_1 є ідеально плоскою, а поверхня верхнього тіла S_2 має мікротекстурований рельєф, утворений періодичною системою виїмок однакової форми ширини $2b$ кожна, розташованих з періодом d (рис. 1). При $-d/2 \leq x \leq d/2$ форма виїмки описується неперервно диференційовною функцією

$$r(x) = r_0 \left(1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\pi x/d)}{\operatorname{tg}^2(\pi b/d)} \right)^{3/2}, \quad r(x) \ll b, \quad r'(x) \ll 1.$$

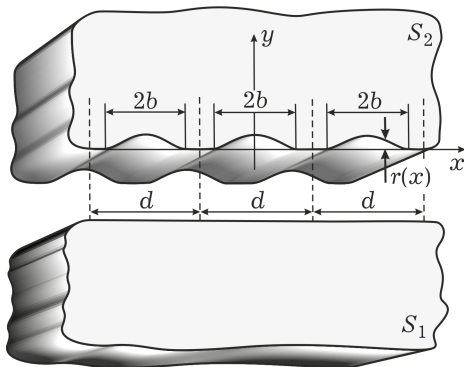


Рис. 1

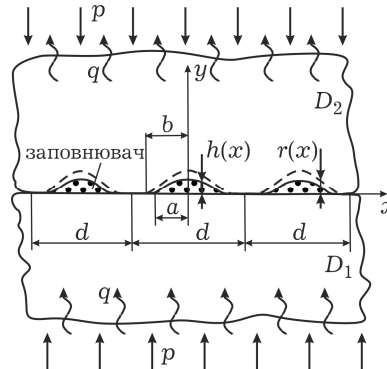


Рис. 2

Тіла вступають у контакт під дією номінального тиску p і номінального теплового потоку q , прикладених на нескінченності. Вважаючи, що у тілах реалізується двовимірне поле температури і стан плоскої деформації, розглядатимемо взаємодію двох півплощин D_1 і D_2 , утворених перетином тіл координатною площиною Oxy (рис. 2). Внаслідок початкової регулярної текстури межі верхнього тіла між поверхнями, що контактують, утворяться періодично розміщені зазори, висота $h(x)$ і ширина $2a$ яких невідомі та залежать від прикладеного силового і теплового навантажень. Кожен зазор містить теплопровідне середовище (газ, рідину) з однаковим коефіцієнтом теплопровідності λ . Його вплив на контактний теплообмін враховуватимемо термоопором (1). Вважаємо, що заповнювач не чинить тиску на поверхні зазорів. На ділянках налягання поверхонь тіл сили тертя відсутні, а тепловий контакт є ідеальним.

У статті [14] здійснено математичне формулювання плоскої контактної задачі термопружності для такої структури та запропоновано методику її розв'язування. У результаті для дискретного набору значень тиску, густини теплового потоку і коефіцієнта теплопровідності міжконтактного середовища було встановлено геометричні параметри зазорів (їх ширину і висоту), стрибок температури між берегами зазорів і контактний тиск поверхонь і виявлено їх зміну зі зміною напрямку теплового потоку на протилежний.

2. Ефективний контактний термоопір і явище термічної ректифікації. Ефективний контактний термоопір R_{eff} розглянутої структури розраховуватимемо за формулою [15, 26]

$$R_{\text{eff}} = \frac{\gamma_{\text{av}}}{q},$$

де γ_{av} – усереднений стрибок температури.

Як зазначено вище, стрибок температури між берегами зазорів залежить від напрямку теплового потоку. Оскільки усереднений стрибок температури безпосередньо пов'язаний з стрибком температури між берегами зазорів співвідношенням [14]

$$\gamma_{\text{av}} = \frac{1}{d} \int_{-a}^a \gamma(x) dx,$$

то ефективний контактний термоопір також залежить від напрямку теплового потоку, а отже, має місце явище термічної ректифікації.

Розрахунок ефективного контактного термоопору регулярно текстурованих тіл проведемо для пари матеріалів «неіржавна сталь AISI 304 (матеріал тіла D_1) – сплав нікелю 200 (матеріал тіла D_2)» за заповнення зазорів такими середовищами: *аргон, вода, гелій, кисень, повітря*.

Властивості неіржавної сталі AISI 304 [28]:

- коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha_1 = 17.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$;
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = 16.3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$;
- коефіцієнт Пуассона $\nu_1 = 0.2532$;
- термічна дистортивність $\delta_1 = \alpha_1(1 + \nu_1)/\lambda_1 = 1.3301 \cdot 10^{-3} \text{ мм/Вт}$;
- модуль Юнга $E_1 = 193 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Властивості сплаву нікелю 200 [16]:

- коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha_2 = 13.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$;
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda_2 = 67.1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$;
- коефіцієнт Пуассона $\nu_2 = 0.264$;
- термічна дистортивність $\delta_2 = \alpha_2(1 + \nu_2)/\lambda_2 = 0.2505 \cdot 10^{-3} \text{ мм/Вт}$;
- модуль Юнга $E_2 = 204 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Коефіцієнти теплопровідності середовищ, які заповнюють зазори [25]:

- аргон $\lambda_f = 0.0172 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$;
- вода $\lambda_f = 0.628 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$;
- гелій $\lambda_f = 0.149 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$;
- кисень $\lambda_f = 0.0182 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$;
- повітря $\lambda_f = 0.026 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{K)}$.

Ширина виїмок $2b$ рівна 2 мм, період d рівний 4 мм.

На рис. 3 – рис. 6 використано такі позначення: суцільні криві відповідають напрямку теплового потоку від неіржавної сталі AISI 304 до сплаву нікелю 200 (у цьому випадку напрям теплового потоку співпадає з напрямом осі Oy , тобто $q > 0$), штрихові криві відповідають напрямку теплового потоку від сплаву нікелю 200 до неіржавної сталі AISI 304 (у цьому випадку напрям теплового потоку протилежний до напрямку осі Oy , тобто $q < 0$), криві 1 – аргону, 2 – воді, 3 – гелію, 4 – кисню, 5 – повітряю.

На рис. 3 зображено залежність ефективного контактного термоопору R_{eff} від прикладеного тиску p для максимальної висоти виїмок $r_0 = 0.002 \text{ мм}$ і густини теплового потоку $|q| = 1 \text{ Вт/мм}^2$. За двох протилежних напрямів теплового потоку термоопір R_{eff} спадає зі збільшенням значення p і стає рівним нулеві при $p \approx 125.2 \text{ МПа}$ (це тиск, який спричиняє закриття усіх зазорів, тобто повний контакт тіл). Для кожного з розглянутих заповнювачів термоопір R_{eff} є більшим у разі теплового потоку, напрямленого до неіржавної сталі (до матеріалу з більшою термічною дистортивністю). За фіксованих значень p і q ($q = 1$ або $q = -1$) термоопір R_{eff} є найменшим у разі заповнення зазорів водою (вода має найбільший коефіцієнт теплопровідності серед розглянутих у цій роботі заповнювачів) і найбільшим у випадку заповнення зазорів аргоном (аргон має найменший коефіцієнт теплопровідності серед розглянутих у цій роботі заповнювачів).

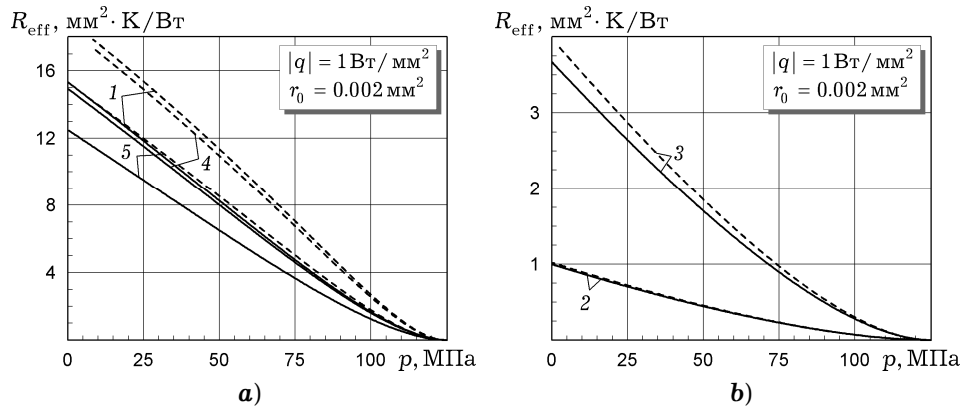


Рис. 3

Потрібно зазначити, що на рис. 3 штрихові криві не перетинають вісь $p = 0$. Це пов'язано з тим, що у праці [14] розв'язок контактної задачі термомпружності побудовано за припущення, що $a \leq b$. Результати статті [14] свідчать, що у випадку теплового потоку, напрямленого до матеріалу з більшою термічною дистортивністю, ширина зазорів $2a$ є рівною ширині виїмок $2b$ при деякому значенні p^* , яке є більшим від нуля (p^* є різним для кожного набору вхідних параметрів задачі). Тому для того щоб розрахувати термоопір R_{eff} за такого напрямку теплового потоку для значень p з діапазону $0 \leq p < p^*$, необхідно розв'язати сформульовану в [14] задачу термомпружності при $a > b$. Це виходить за рамки дослідження, яке проводимо у цій роботі.

Рис. 4 і рис. 5 ілюструють залежність ефективного контактного термоопору R_{eff} від модуля густини теплового потоку $|q|$ для максимальної висоти виїмок $r_0 = 0.002 \text{ мм}$ та тиску $p = 50 \text{ МПа}$ і $p = 100 \text{ МПа}$ відповідно. Якщо тепловий потік спрямований від сплаву нікелю до неіржавної сталі, збільшення $|q|$ зумовлює ріст термоопору R_{eff} . Якщо тепловий потік спря-

мований від неіржавної сталі до сплаву нікелю, збільшення $|q|$ зумовлює зменшення термоопору R_{eff} . Коли заповнювачем є вода або гелій, то зі змінною $|q|$ термоопір R_{eff} змінюється за законом, близьким до лінійного.

Щоб оцінити рівень термічної ректифікації для досліджуваної структури, використаємо параметр (показник термічної ректифікації) [31]

$$\varepsilon = (R_{\text{Ni} \rightarrow \text{SS}} - R_{\text{SS} \rightarrow \text{Ni}}) / R_{\text{Ni} \rightarrow \text{SS}} \cdot 100 \%$$

Тут $R_{\text{Ni} \rightarrow \text{SS}}$ – значення ефективного контактного термоопору, коли тепловий потік напрямлений від сплаву нікелю до неіржавної сталі; $R_{\text{SS} \rightarrow \text{Ni}}$ – значення ефективного контактного термоопору, коли тепловий потік напрямлений від неіржавної сталі до сплаву нікелю.

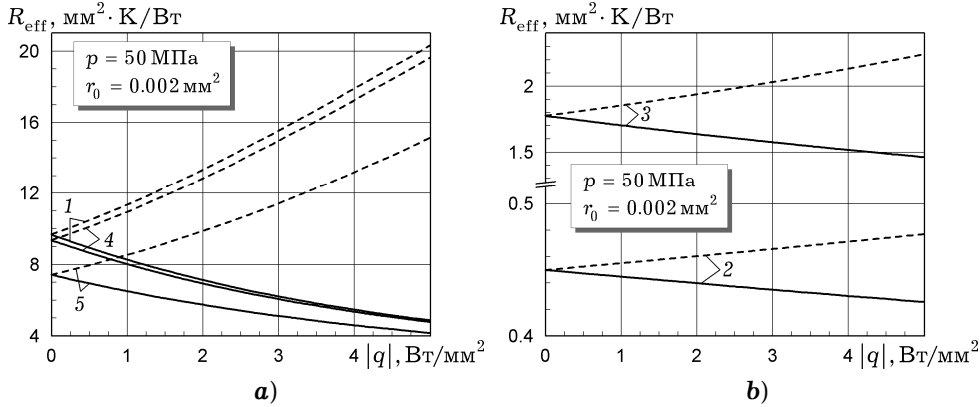


Рис. 4

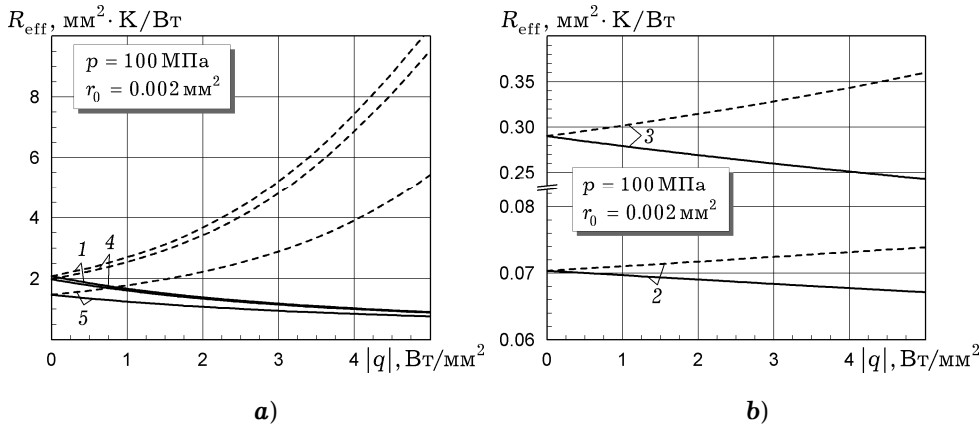


Рис. 5

На рис. 6 зображено залежність показника термічної ректифікації ε від модуля густини теплового потоку $|q|$ для максимальної висоти виїмок $r_0 = 0.002$ та тисків $p = 50 \text{ МПа}$ і $p = 100 \text{ МПа}$. Рівень термічної ректифікації зростає зі збільшенням модуля густини теплового потоку. За фіксованих значень p і $|q|$ рівень термічної ректифікації є найвищим, коли в зазорах міститься аргон, і найнижчим, коли зазори заповнює вода. За наявності в зазорах аргону або повітря збільшення p зумовлює збільшення рівня термічної ректифікації. Водночас, коли заповнювачем є вода або гелій, збільшення p зумовлює зменшення рівня термічної ректифікації. З рисунка видно, що рівень термічної ректифікації у випадку заповнення зазорів аргонном може досягати 85 %.

На рис. 7 зображено залежність показника термічної ректифікації ε від модуля густини теплового потоку $|q|$ для максимальної висоти виїмок $r_0 = 0.02$ і тиску $p = 100$ МПа. Порівняння даних на цьому рисунку з даними на рис. 6 засвідчує, що збільшення максимальної висоти виїмок приводить до істотного зменшення рівня термічної ректифікації. Тому з метою підвищення рівня термічної ректифікації під час контактної взаємодії тіл необхідно текстурувати поверхні тіл виїмками якнайменшої максимальної висоти.

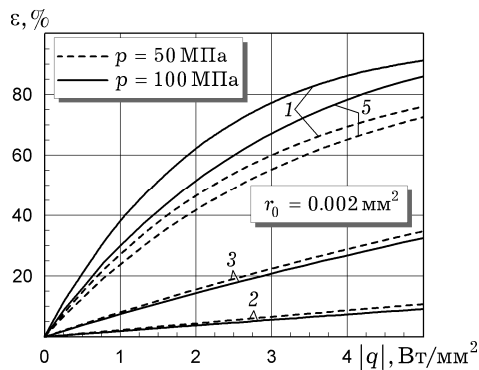


Рис. 6

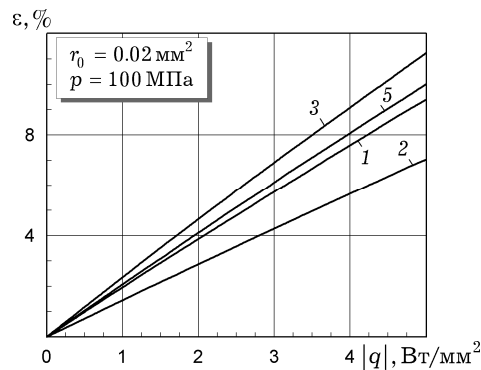


Рис. 7

Висновки. На основі розв'язку задачі термопружності про контакт тіла з плоскою поверхнею і тіла з мікротекстурованим рельєфом поверхні, утвореним періодичною системою виїмок однакової форми, отриманого у [14], проведено розрахунок ефективного контактного термоопору та рівня термічної ректифікації для такої структури. Матеріалом текстурованого тіла вибрано неіржавну сталь AISI 304, матеріалом іншого тіла – сплав нікелю 200. Міжконтактні зазори заповнюють такі речовини: аргон, вода, гелій, кисень і повітря. Встановлено, що:

- ефективний контактний термоопір розглянутої структури є різним для двох протилежних напрямів теплового потоку, причому він є більшим у випадку теплового потоку, напрямленого від сплаву нікелю до неіржавної сталі (до матеріалу з більшою термічною дистортивністю);
- збільшення модуля густини теплового потоку зумовлює збільшення ефективного контактного термоопору у випадку теплового потоку, напрямленого до неіржавної сталі, та його зменшення у випадку протилежного напрямку теплового потоку;
- збільшення модуля густини теплового потоку спричиняє збільшення рівня термічної ректифікації;
- ефективний контактний термоопір і рівень термічної ректифікації є найменшими у випадку заповнення зазорів водою і найбільшими – у випадку заповнення зазорів аргонном;
- ефективний контактний термоопір спадає зі збільшенням зовнішнього тиску;
- збільшення зовнішнього тиску зумовлює збільшення рівня термічної ректифікації за наявності в зазорах аргону або повітря і його зменшення за наявності в зазорах води або гелію;
- збільшення максимальної висоти виїмок приводить до істотного зменшення рівня термічної ректифікації;
- рівень термічної ректифікації у випадку заповнення зазорів аргонном може досягати 85%.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом Ф63/43-2016 Державного фонду фундаментальних досліджень.

1. Гольдштейн Р. В., Кит Г. С., Мартиньяк Р. М., Середницька Х. І. Ефект часткового закриття міжфазної тріщини з теплопровідним заповнювачем і поверхневими плівками при дії на біматеріал термічного навантаження // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2012. – **55**, № 4. – С. 64–73.
Te same: Goldstein R. V., Kit H. S., Martynyak R. M., Serednytska Kh. I. Effect of partial closure of an interface crack with heat-conducting filler and surface films in the case of thermal loading of a bimaterial // *J. Math. Sci.* – 2014. – **198**, No. 1. – P. 75–86.
2. Кит Г. С., Кривцун М. Г. Плоские задачи термоупругости для тел с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1983. – 280 с.
3. Кит Г. С., Подстригач Я. С. Определение стационарного температурного поля и напряжений в окрестности щели, обладающей термосопротивлением // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1966. – **2**, № 3. – С. 247–252.
Te same: Kit G. S., Podstrigach Ya. S. Determination of the stationary temperature field and stresses in the vicinity of a slit possessing heat resistance // *Sov. Mater. Sci.* – 1967. – **2**, No. 3. – P. 177–181.
4. Кит Г. С., Френчко Ю. С. Влияние теплопроницаемости дугообразной трещины на термоупругое состояние в ее окрестности // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1973. – **9**, № 1. – С. 75–80.
Te same: Kit G. S., Frenchko Yu. S. Influence of the thermal permeability of an arc-shaped crack on the thermoelastic state in its neighborhood // *Sov. Mater. Sci.* – 1975. – **9**, No. 1. – P. 70–74.
5. Мартиньяк Р. М. Термонапружений стан біматеріалу із закритою міжфазною тріщиною з шорсткими поверхнями // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2010. – **53**, № 1. – С. 71–79.
Te same: Martynyak R. M. Thermal stress state of a bimaterial with a closed interfacial crack having rough surfaces // *J. Math. Sci.* – 2011. – **176**, No. 4. – P. 578–589.
6. Мартиньяк Р. М., Гончар Х. І., Нагалка С. П. Моделювання термомеханічного закриття початково розкритої міжфазної тріщини, наділеної термоопором // *Физ.-хим. механіка матеріалів.* – 2003. – **39**, № 5. – С. 59–66.
Te same: Martynyak R. M., Honchar Kh. I., Nahalka S. P. Simulation of thermo-mechanical closure of an initially open interface crack with heat resistance // *Mater. Sci.* – 2003. – **39**, No. 5. – P. 672–681.
7. Мартиньяк Р. М., Чумак К. А. Термопружне розшарування тіл за наявності теплопроникного заповнювача міжконтактного просвіту // *Физ.-хим. механіка матеріалів.* – 2009. – **45**, № 4. – С. 45–52.
Te same: Martynyak R. M., Chumak K. A. Thermoelastic delamination of bodies in the presence of a heat-conducting filler of the intercontact gap // *Mater. Sci.* – 2009. – **45**, No. 4. – P. 513–522.
8. Мартиньяк 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. – **51**, № 3. – С. 163–175.
Te same: Martynyak R. M., Chumak K. A. Thermoelastic contact of half-spaces with equal thermal distortivities in the presence of a heat-permeable intersurface gap // *J. Math. Sci.* – 2010. – **165**, No. 3. – P. 355–370.
9. Опанасович В., Басса Н. Термопружний стан пластини з довільно орієнтованими теплопроникними тріщинами вздовж дуг кіл з врахуванням гладкого контакту берегів тріщин // *Машинознавство.* – 2008. – № 11. – С. 19–24.
10. Середницька Х. І., Слободян Б. С., Мартиньяк Р. М. Плоская задача термоупругости для тела с теплопроницаемой щелью переменной высоты // *Теорет. и прикл. механика.* – 2013. – Вып. 6 (52). – С. 135–141.
11. Середницька Х., Мартиньяк Р. Термонапружений стан біматеріалу з періодичною системою міжфазних тріщин, заповнених теплопровідною речовиною // *Физ.-мат. моделювання та інформ. технології.* – 2014. – Вип. 19. – С. 168–175.
12. Харитонов В. В., Якутин Н. В. Контактный теплообмен разнородных материалов // *Журн. техн. физики.* – 1997. – **67**, № 2. – С. 1–6.
Te same: Kharitonov V. V., Yakutin N. V. Contact heat transfer between dissimilar materials // *Tech. Phys.* – 1997. – **42**, No. 2. – P. 125–129.
13. Чумак К. Ефект напрямленості теплового потоку у разі заповненого теплопроникним середовищем зазору на межі двох тіл // *Физ.-мат. моделювання та інформ. технології.* – 2013. – Вип. 17. – С. 219–225.

14. Чумак К. А., Мартиняк Р. М. Термопружна взаємодія тіл з регулярною текстурою поверхонь за наявності теплопроникного середовища в міжконтактних зазорах // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2013. – **56**, № 1. – С. 52–61.
Te same: Chumak K. A., Martyniak R. M. Thermoelastic interaction of the bodies with regular surface textures in the presence of heat-permeable media in the intercontact gaps // *J. Math. Sci.* – 2014. – **201**, No. 1. – P. 60–71.
15. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. – Москва: Энергия, 1977. – 328 с.
16. *ASM specialty handbook: nickel, cobalt, and their alloys* / Ed J. R. Davies. – Materials Park, OH: ASM International, 2000. – 442 p.
17. Bahrami M., Yovanovich M. M., Culham J. R. Thermal joint resistances of conforming rough surfaces with gas-filled gaps // *J. Thermophys. Heat Transf.* – 2004. – **18**, No. 3. – P. 318–325.
18. Bahrami M., Yovanovich M. M., Culham J. R. Thermal joint resistances of nonconforming rough surfaces with gas-filled gaps // *J. Thermophys. Heat Transf.* – 2004. – **18**, No. 3. – P. 326–332.
19. Barber J. R. The effect of thermal distortion on constriction resistance // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1971. – **14**, No. 6. – P. 751–766.
20. Barzelay M. E., Tong K. N., Holloway G. F. Effect of pressure on thermal conductance of contact joints. – NACA Techn. Note-3295, 1955.
21. Cetinkale T. N., Fishenden M. Thermal conductance of metal surfaces in contact // In: *Proceedings of General Discussion on Heat Transfer.* – London: Institution of Mechanical Engineers, 1951. – P. 271–275.
22. Chumak K., Malanchuk N., Martyniak 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. – **84**. – P. 138–146.
23. Chumak K., Martyniak R. Thermal rectification between two thermoelastic solids with a periodic array of rough zones at the interface // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2012. – **55**, No. 21–22. – P. 5603–5608.
24. Clausing A. M. Heat transfer at the interface of dissimilar metals – the influence of thermal strain // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1966. – **9**, No. 8. – P. 791–801.
25. *CRC handbook of engineering tables* / Ed R. C. Dorf. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. – 656 p.
26. Das A. K., Sadhal S. S. Analytical solution for constriction resistance with interstitial fluid in the gap // *Heat Mass Transf.* – 1998. – **34**, No. 2–3. – P. 111–119.
27. Dundurs J., Panek C. Heat conduction between bodies with wavy surfaces // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1976. – **19**, No. 7. – P. 731–736.
28. *Engineering properties of steel* / Ed Ph. D. Harvey. – Metals Park, OH: American Society for Metals, 1982. – v+527 p.
29. Fenech H., Rohsenow W. M. Prediction of thermal conductance of metallic surfaces in contact // *Trans. ASME. J. Heat Transf.* – 1963. – **85**, No. 1. – P. 15–24.
30. Lewis D. V., Perkins H. C. Heat transfer at the interface of stainless steel and aluminum – the influence of surface conditions on the directional effect // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1968. – **11**, No. 9. – P. 1371–1383.
31. Madhusudana C. V. Thermal contact conduction and rectification at low joint pressures // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 1993. – **20**, No. 1. – P. 123–132.
32. Madhusudana C. V., Fletcher L. S. Gas conductance contribution to contact heat transfer // *AIAA Paper No. 81–1163.* – 1981.
33. Martyniak R., Chumak K. Effect of heat-conductive filler of interface gap on thermoelastic contact of solids // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2012. – **55**, No. 4. – P. 1170–1178.
34. Mentes A., Sheffield J. W., Veziroglu T. N., Williams A., Samudrala R. Effects of interface gases on contact conductance // *AIAA Paper.* <https://doi.org/10.2514/6.1981-214>
35. Misra P., Nagaraju J. Thermal gap conductance at low contact pressures (<1 MPa): effect of gold plating and plating thickness // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2010. – **53**, No. 23–24. – P. 5373–5379.
36. O'Callaghan P. W., Probert S. D., Jones A. A thermal rectifier // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1970. – **3**, No. 9. – P. 1352–1358.
37. Roberts N. A., Walker D. G. A review of thermal rectification observations and models in solid materials // *Int. J. Therm. Sci.* – 2011. – **50**, No. 5. – P. 648–662.
38. Rogers G. F. C. Heat transfer at the interface of dissimilar metals // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1961. – **2**, No. 1–2. – P. 150–154.
39. Savija I., Culham J. R., Yovanovich M. M., Marotta E. E. Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials // *J. Thermophys. Heat Transf.* – 2003. – **17**, No. 1. – P. 43–52.

40. 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. – **22**, No. 1. – P. 41–50.
41. Song S., Yovanovich M. M., Goodman F. O. Thermal gap conductance of conforming surfaces in contact // Trans. ASME. J. Heat Transf. – 1993. – **115**, No. 3. – P. 533–540.
42. Song S., Yovanovich M. M., Nho K. Thermal gap conductance: effects of gas pressure and mechanical load // J. Thermophys. Heat Transf. – 1992. – **6**, No. 1. – P. 62–68. – <https://doi.org/10.2514/3.319>.
43. Springer G. S. Heat transfer in rarefied gases // In: Advances in Heat Transfer, Vol. 7 / Eds T. F. Irvine, J. P. Hartnett. – New York: Acad. Press, 1971. – P. 163–218.
44. Stevenson P. F., Peterson G. P., Fletcher L. S. Thermal rectification in similar and dissimilar metal contacts // Trans. ASME. J. Heat Transf. – 1991. – **113**, No. 1. – P. 30–36.
45. Thangjitham S., Choi H. J. Thermal stress singularities in an anisotropic slab containing a crack // Mech. Mater. – 1993. – **14**, No. 3. – P. 223–238.
46. Thomas T. R., Probert S. D. Thermal contact resistance: the directional effect and other problems // Int. J. Heat Mass Transf. – 1970. – **13**, No. 5. – P. 789–807.
47. Yovanovich M. M. Apparent conductivity of glass microspheres from atmospheric pressure vacuum // ASME Paper No. 73-HT-43. – 1973.
http://www.mhtlab.uwaterloo.ca/pdf_papers/mhtl73-3.pdf.
48. Yovanovich M. M., DeVaal J., Hegazy A. H. A statistical model to predict thermal gap conductance between conforming rough surfaces // AIAA Paper No. 82-0888. – 1982. – http://www.mhtlab.uwaterloo.ca/pdf_papers/mhtl82-2.pdf.
49. 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.
http://www.mhtlab.uwaterloo.ca/pdf_papers/mhtl74-1.pdf.
50. Zhong X.-C., Wu B. Thermoelastic analysis for an opening crack in an orthotropic material // Int. J. Fract. – 2012. – **173**, No. 1. – P. 49–55.
51. Zhou Y., Li X., Yu D. A partially insulated interface crack between a graded orthotropic coating and a homogeneous orthotropic substrate under heat flux supply // Int. J. Solids Struct. – 2010. – **47**, No. 6. – P. 768–778.

ЭФФЕКТИВНОЕ КОНТАКТНОЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ РЕГУЛЯРНО ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ТЕЛ ПРИ НАЛИЧИИ МЕЖКОНТАКТНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОЙ СРЕДЫ И ЯВЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Рассчитано эффективное контактное термосопротивление пары материалов «нержавеющая сталь AISI 304 – сплав никеля 200» при наличии на интерфейсе между ними периодической системы зазоров, заполненных теплопроводной средой (аргоном, водой, гелием, кислородом или воздухом). В недеформированном состоянии поверхность нержавеющей стали AISI 304 имеет микротекстурированный рельеф, образованный регулярно расположенными выемками одинаковой формы, а поверхность сплава никеля 200 является идеально плоской. Выполнена оценка уровня термической ректификации для такой структуры при различных значениях приложенных силовой и тепловой нагрузок и максимальной высоты поверхностных выемок.

EFFECTIVE CONTACT THERMAL RESISTANCE OF REGULARLY TEXTURED BODIES IN THE PRESENCE OF INTERCONTACT HEAT-CONDUCTING MEDIUM AND THE THERMAL RECTIFICATION PHENOMENON

The effective contact thermal resistance of a pair of materials «stainless steel AISI 304 – nickel 200» in the presence on the interfaces between them an periodic array of interface gaps filled with the heat-conducting medium (argon, water, helium, hydrogen or air) is calculated. In their undeformed state, the stainless steel AISI 304 surface has microtextured relief formed by regularly arranged grooves of identical shape, and the nickel 200 surface is perfectly flat. The estimation of the level of thermal rectification is carried out for such a structure at the different values of applied mechanical and thermal loads and maximum height of the surface grooves.

Ин-т прикл. проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів

Одержано
31.03.16