

УДК 621.791

Лисак В.В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація

Приведені дані по підвищенню інтенсивності теплообміну двох твердих тіл. Показано, що збільшення зусилля притискання істотно не впливає на інтенсивність відведення теплоти. Найбільший вплив на величину термічної провідності надає не фактична площа контакту, а крок між контактуючими областями. Показано, що істотне підвищення тепловідвідних функцій оснащення можливе, коли крок між контактуючими областями не перевищує 2 мм. Запропонована конструкція тепловідвідного притискача, який забезпечує достатньо високу інтенсивність відведення теплоти із зони зварювання.

Abstract

Information is resulted on the increase of intensity of heat exchange of two solids. It is shown that multiplying effort of pinning does not have substantial influence on intensity of taking of heat. Most influence on the size of thermal conductivity renders not actual area of contact, but step between contacting regions. It is shown that the substantial increase of heat taking functions of rigging is possible, when a step between contacting regions does not exceed 2 mm. The construction of heat taking clamp providing high enough intensity of taking of heat from the area of welding is offered.

Зварювання тонколистових конструкцій виконується, як правило, з використанням притискних

елементів. Такі притискні пристрої фіксують крайки, що зварюються, у процесі зварювання, а, крім того, виконують функцію тепловідвідних елементів, що стабілізують тепловий стан зварювальної ванни. Крім того, інтенсивне відведення теплоти дозволяє зменшувати ширину зварного шва і ширину зони пластичних деформацій, що є важливим з погляду точності виготовлення конструкцій з товщиною стінки 0,3–1 мм. Таким чином, вплив тепловідведення на формування тонколистового зварного з'єднання з титанового [1, 2] та алюмінієвого [3] сплавів є дуже великим, тому забезпечення стабільного та інтенсивного відведення теплоти з зони зварювання є актуальною задачею.

При складанні під зварювання тепловідвідні притискачі розміщують на поверхні виробу, що зварюється, у безпосередній близькості від очікуваної лінії сплавлення, причому поверхні виробу і притискача в процесі зварювання знаходяться у твердому (нерозплавленому) стані (рис. 1).

Контакт двох твердих тіл характеризується термічною провідністю, тобто здатністю тіла (або якого-небудь шару) проводити певну кількість теплоти в одиницю часу через одиницю площі.

Поверхні реальних твердих тіл ніколи не бувають абсолютно гладкими. Нерівності на поверхнях тіл, що контактують, можуть бути обумовлені як характером попередньої технологічної обробки, так і процесом тертя та спрацювання. Окрім цього, на поверхні з гетерогенною структурою під впливом навантаження утворюється шорсткість внаслідок їх неоднорідного



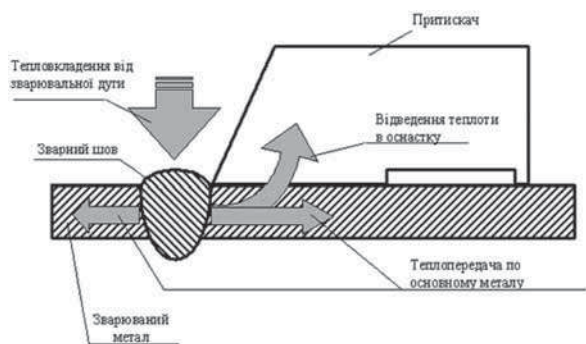
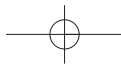


Рис. 1. Схема відведення теплоти при зварюванні

деформування. [4, 5]. Тому контакт між твердими тілами завжди має дискретний характер.

До геометричних характеристик відносяться шорсткість, хвилястість та макрогеометрія поверхонь, що контактують.

Шорсткість являє собою сукупність нерівностей, які повторюються з відносно малими кроками. Наряду з середньою висотою $H_{\text{сер}}$ мікроступів, до параметрів, які характеризують шорсткість, відносяться також максимальна висота H_{max} мікроступів, коефіцієнт заповнення профілю та шаг нерівностей, радіус $r_{\text{ш}}$ закруглення вершин мікроступів.

Хвилястість поверхонь представляє собою сукупність підвищень та впадин, які періодично повторюються з взаємною відстанню, значно більшою, ніж у нерівностей, які утворюють шорсткість.

Макрогеометрія поверхонь характеризується різними похибками форми поверхонь, серед яких характерною похибкою є неплоскісність [6]. Для циліндричних поверхонь, типовими похибками є конусність, бочкоподібність, корсетність, овальність, огранка.

Виходячи з умов контактування, розрізняють (рис. 2):

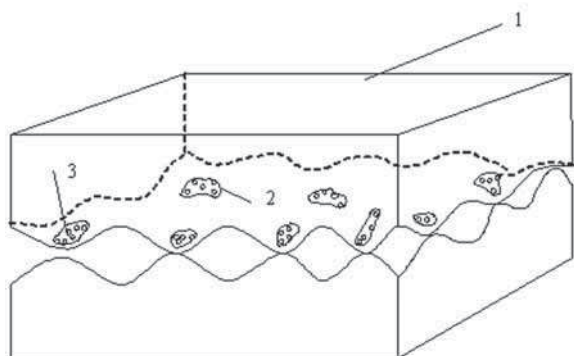


Рис. 2. Схема контакту двох поверхонь.
1 – номінальна площа; 2 – контурна площа;
3 – фактична площа (окремі ділянки в контурі)

- фактичну площу контакту A_r , яка представляє собою суму малих площин контакту, що утворюються внаслідок деформації мікронерівностей;

- контурну площу контакту A_c , обумовлену хвилястістю та утворену з площ змінання окремих хвиль;

- номінальну площу контакту A_a , яка представляє собою геометричне місце всіх можливих фактичних площ контакту. У інженерній практиці її визначають по зовнішнім розмірам тіл, що контактують.

Співвідношення між цими параметрами описуються безрозмірними величинами

$$\eta_1 = \frac{A_r}{A_c}; \quad \eta_2 = \frac{A_c}{A_a}; \quad \eta_3 = \frac{A_r}{A_a}$$

Термічний опір, що виникає при передачі теплоти через контактуючі поверхні твердих тіл, також обумовлений дискретним характером фактичного контакту поверхонь (рис. 3) [7]. Площа фактичного контакту складає лише незначну частку від номінальної поверхні контакту. У зв'язку з цим, у зоні контакту різко зменшується перетин контактуючих тіл, який проводить тепло, що приводить до скривлення ліній теплового потоку і сильному зростанню температурного градієнта.

Приймаючи до уваги малий розмір теплової контактної зони в напрямку z , розподіл температур у контактуючих тілах приблизно можна представити у вигляді прямих A_1A_2 і B_1B_2 з температурним стрибком ΔT_k у площині контакту.

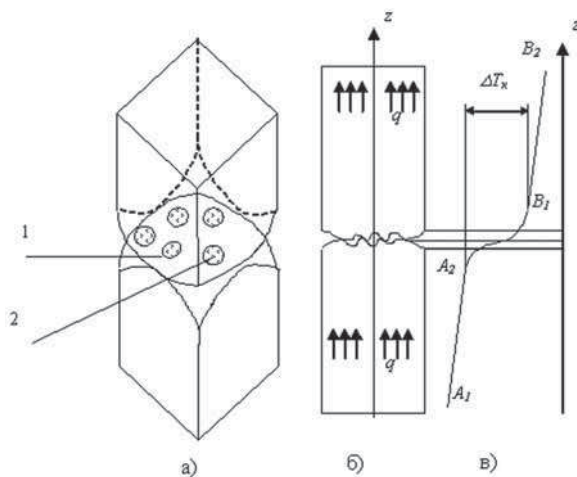
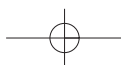
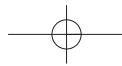


Рис. 3. а – схема контактування шорстких та хвилястих поверхонь, б – елементарний тепловий канал з однією контурною площадкою, в – розподіл температури у тілах, що контактують; 1 і 2 – ділянки контурної та фактичної площі контакту





Теплову взаємодію двох твердих тіл, що контактують, можна уявити у вигляді теплових каналів, по яким проходить передача теплоти [7].

У загальному випадку теплопередача між контактуючими твердими тілами здійснюється теплопровідністю через ділянки фактичного контакту і через прошарок середовища, що заповнює простір між нерівностями поверхонь, а також шляхом теплового випромінювання [8].

Повна термічна провідність контакту може бути представлена у вигляді суми окремих складових:

$$\alpha_k = \alpha_m + \alpha_c + \alpha_l,$$

де α_m – термічна провідність фактичного контакту; α_c – термічна провідність середовища в контакті; α_l – складова повної провідності, обумовлена випромінюванням.

Виконані дослідження показали, що частка теплового випромінювання в повній термічній провідності контакту не перевищує, як правило, 2–3% [7]. Тому на практиці величиною α_l зазвичай зневажають.

На рис. 4 показані схеми елементарних теплових каналів, використовуваних надалі при аналізі контактної теплопередачі.

При рівномірному розподілі плям фактичного контакту з радіусом r_ϕ по номінальній поверхні задача визначення температурного поля в зоні контакту і термічного опору контакту зводиться до рішення рівняння Лапласа для теплового каналу, показаного на рис. 4, а, [8].

Термічна провідність одичинної ізотермічної плями визначається виразом:

$$\alpha_m = \frac{2\lambda_m r_\phi}{\psi \left(\frac{r_\phi}{r_o} \right)} \quad (1)$$

$$\text{де } \psi \approx 1 - 1.41 \frac{r_\phi}{r_o} + 0.3 \left(\frac{r_\phi}{r_o} \right)^3$$

r_ϕ – середній радіус плями фактичного контакту; r_o – середній радіус теплового каналу; λ_m – приведений коефіцієнт теплопровідності контактуючої пари.

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_{m1}\lambda_{m2}}{\lambda_{m1} + \lambda_{m2}}$$

Як видно з формули (1), при відомих значеннях коефіцієнтів теплопровідності зварюваного металу та притискача, термічна провідність залежить в першу чергу від площі плям фактичного контакту.

При рівномірному розподілі плям фактичного контакту по номінальній поверхні величина α_m може бути розрахована за формулою:

$$\alpha_m = \frac{2\lambda_m \eta}{\pi r_\phi \psi(\eta)} \quad (2)$$

$$\text{де } \psi(\eta) \approx 1 - 1.41\eta^2 + 0.3\eta^3$$

η – відношення фактичної площі контакту до номінальної.

Варто також врахувати, що при формуванні плям фактичного контакту під навантаженням, відбувається зближення контактуючих поверхонь, у результаті чого буде зменшуватися об'єм повітряного зазору в місці контакту, тобто буде збільшуватися щільність контакту, яка представляє собою частку, що складає метал, стосовно всього обсягу області контакту. Очевидно, що таке явище також буде сприяти підвищенню термічної провідності контакту.

Середня товщина зазору може бути визначена виразом [9]

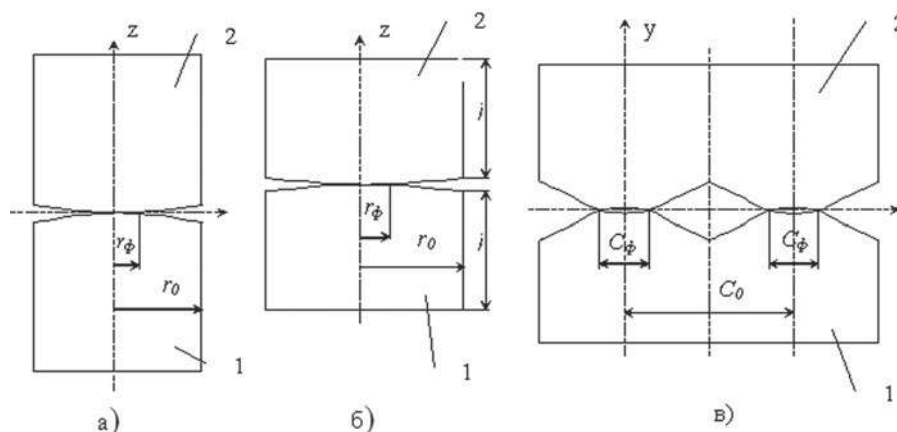
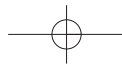


Рис. 4. Схеми теплових каналів для розрахунку термічного опору контакту тіл 1 та 2
а, б – циліндричні теплові канали нескінченної та обмеженої висоти;
в – двовірний періодичний контакт





$$h(q) = \frac{\left[\left(\frac{1}{2b} \right)^{\frac{1}{\nu}} - \left(\frac{q}{3 \cdot \sigma_T \cdot b} \right)^{\frac{1}{\nu}} - \beta \left(\frac{q}{3 \cdot \sigma_T \cdot b} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right]}{H_{\max}} \quad (3)$$

де q — тиск у контакті; σ_T — межа текучості матеріалу; b , ν — коефіцієнти опорної кривої.

$$\beta = \frac{\pi^{\frac{3}{2}} J C \sigma_T I}{\Delta A_c^{\frac{1}{2}}}$$

Значення J у цій формулі відповідає вихідній шорсткості.

H_{\max} — максимальна висота мікровиступів.

Таким чином, аналіз рівнянь 1, 2 та 3 показує, що на параметри, які забезпечують термічну провідність у місці контакту, дуже великий вплив оказує фактична площа контакту двох тіл і зусилля притискання.

Для визначення площі дотику використовується рівняння Герца для контакту пружних тіл. Так, у випадку контакту сфери з площиною, радіус площадки контакту дорівнює [10]

$$\rho = 0.9 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{1}{3}} D^{\frac{1}{3}} N^{\frac{1}{3}}$$

де ρ — радіус площі контакту; N — навантаження; D — діаметр сфери; μ — коефіцієнт Пуассона; E — модуль пружності.

Формули Герца справедливі для випадку, коли матеріал, що контактує — ізотропний, підкоряється закону Гука, розміри площадки малі порівняно з радіусами кривизни тіл, що контактують та стискаючі сили направлені по нормалі до площини контакту.

Звідси легко бачити, що для того, щоб підвищити інтенсивність тепловідведення, потрібно дослідити шляхи збільшення фактичної площі контакту та можливості виключення зазору між контактуючими поверхнями.

Розраховуючи площини контакту окремих сфер по формулі Герца і сумуючі їх, І.Ф. Арчард [11] вказує на залежність фактичної площі від навантаження. Аналогічна залежність описана у роботі [12] — площа контакту збільшується при зростанні навантаження.

Таким чином, найбільш ефективним представляється можливість збільшення площі фактичного контакту при збільшенні навантаження, що діє на тіло в зоні контакту.

Залежність фактичної площі дотику від навантаження при пружному контакті була розглянута в роботі В.А. Журавльова [13]. В цій роботі розглядається контакт двох шорстких поверхонь, модельованих у вигляді набору сфер однакового радіусу.

Більш точний розрахунок площі контакту при пружній взаємодії виступів був зроблений І.В. Крагельським [14], де було розглянуто контактування двох шорстких поверхонь з врахуванням вірогідності зустрічі окремих стрижнів. Наслідки цього дослідження використовуються в [12] і враховуються у подальшому при розгляданні взаємодії двох шорстких поверхонь. В роботі [12] враховується реально існуюча геометрія поверхонь, при цьому в розрахунки вводяться параметри, отримані експериментальним шляхом за допомогою високоточного вимірювального обладнання.

Дві накладені одна на одну поверхні контактують спочатку по трьох точках. Під впливом навантаження відбувається стискання окремих нерівностей, що контактують. Через них передається навантаження на хвилястий півпростір, що викликає стискання цих хвиль. Під дією навантаження поверхні зближуються і все більше число окремих виступів контактують між собою. Одночасно розширюється площа змінання вершин хвиль. Цілком певно, що хвилі, в яких напруження завжди набагато менші, ніж у виступах шорсткості, деформуються пружно.

Таким чином, отримання даних про можливість збільшення площі фактичного контакту для умов зварювання тонколистових матеріалів є досить важливим.

Фактична площа дотику може бути виражена через зближення. Тому для визначення площі дотику як функції навантаження необхідно знайти залежність між зближенням поверхонь і навантаженням.

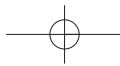
Реальна форма вершин виступів наближається до сферичної, при цьому для даної поверхні радіус сфер змінюється не дуже сильно, так що можливо вказати його середнє значення, типове для даної поверхні. В зв'язку з цим поверхні моделюються набором сфер одного радіусу, розташованих з постійною щільністю, при цьому сфери мають таке розташування по висоті, при якому крива опорної поверхні, що розглядається, співпадає з опорною кривою, що моделюється реальною поверхнею. Відносна площина дотику для деякого зближення a може бути представлена у вигляді:

$$\eta_r = \frac{A_r}{A_c} = \frac{\Delta \bar{A}_r \cdot n_r}{\Delta A_c \cdot n_c} = \frac{\Delta \bar{A}_r}{\Delta A_c} \cdot \varphi$$

де: $\Delta \bar{A}_r$ — середня величина одиничної плями дотику; ΔA_c — контурна площа, що приходить на один виступ; φ — відношення кількості контактуючих виступів n_r до кількості усіх виступів на контурній площадці n_c .

Для сфери, що контактує з абсолютно твердою площиною, при пружному контакті, за формулою Герца отримуємо:





$$\Delta A_{ri} = \pi \cdot r \cdot h_{\max} \cdot \varepsilon_i$$

Задамося функцією φ у вигляді:

$$\varphi = u \cdot \varepsilon^\chi$$

де: u, χ — деякі коефіцієнти; ε — величина зближення, яка визначається формулою:

$$\varepsilon = \frac{a}{h_{\max}}$$

Визначивши коефіцієнти u та χ — можливо зв'язати криву опорної поверхні з кривою розподілення виступів по висоті.

Функція $A_r(n_r)$ може вважатись безпервною, якщо число сфер необмежено зростає, а величина ΔA_r нескінченно спадає. В реальних умовах число виступів поверхні звичайно велике і площа, що приходить на один виступ вельми мала. Тому можливо вважати функцію $A_r(n_r)$ практично безпервною, що і приймається в наступних викладках. Виражаючи площу фактичного контакту як суму площин одиничних плям дотику, отримаємо:

$$A_r = \int_0^{n_r} \Delta A_r \cdot dn_r = \int_0^\varepsilon 2\pi \cdot r \cdot h_{\max} \cdot (\varepsilon - x) \times \\ \times \chi \cdot u \cdot n_a \cdot x^{\chi-1} dx = \frac{2\pi \cdot r \cdot h_{\max} \cdot u \cdot n_a \varepsilon^{\chi+1}}{\chi + 1},$$

де x — поточне значення ε .

Порівнюючи отриманий вираз з формулою $\eta_1 = b\varepsilon^\nu$ [12], знаходимо

$$\chi = \nu - 1$$

і

$$u = \frac{A_a \cdot b \cdot (\chi + 1)}{2\pi \cdot n_a \cdot r \cdot h_{\max}} = \frac{A_a \cdot b \cdot \nu}{2\pi \cdot n_a \cdot r \cdot h_{\max}}.$$

Тобто функцію $\varphi(\varepsilon)$ можливо записати у вигляді

$$\varphi = \frac{A_a \cdot b \cdot \nu \cdot \varepsilon^{\nu+1}}{2\pi \cdot n_a \cdot r \cdot h_{\max}}.$$

Скориставшись отриманими відношеннями, розглянемо контакт шорсткої поверхні притискача з гладкою поверхнею зварюваного метала.

При притисканні листів за допомогою притискача, кожен виступ поверхні взаємодіє з виступами спряженої поверхні багаторазово, тому можливо очікувати, що перетерпівши пластичну деформацію в процесі однієї, або декількох взаємодій, він в подальшому буде деформуватися в значній степені пружно. Крім цього, на формування площі контакту значний вплив створює пружна деформація нерівностей, утворюючих хвилястість.

Тому, для розрахунку фактичної площі контакту, цілком вірним буде скористатись формулами для пружного контакту.

При пружному контакті навантаження N_i , що приходить на одиничний виступ, згідно з формулою Герца, буде дорівнювати

$$N_i = 1.33 \cdot \frac{r^{\frac{1}{2}} \cdot h_{\max}^{\frac{3}{2}}}{1 - \mu^2} \cdot \varepsilon_i^{\frac{3}{2}}$$

Вище було сказано, що функцію $A_r(n_r)$ можливо в першому приближенні вважати безпервною. Тоді навантаження, що приходить на n_r виступів, буде визначатися виразом:

$$N = \int_0^{n_r} N_i \cdot dn_r$$

Підставляючи значення N_i і

$$dn_r = \frac{A_a \cdot b \cdot \nu \cdot \varepsilon^{\nu-2} d\varepsilon}{2\pi \cdot r \cdot h_{\max}}, \text{ отримаємо}$$

$$N_i = \frac{1.33 \cdot E \cdot h_{\max}^{\frac{1}{2}} \cdot A_a \cdot b \cdot \varepsilon}{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot r^{\frac{1}{2}}} \int_0^\varepsilon \nu (\varepsilon - x)^{\frac{3}{2}} \cdot x^{\nu-2} dx = \\ = \frac{0.66 \cdot K_2 \cdot E \cdot h_{\max}^{\frac{1}{2}} \cdot A_a \cdot b \cdot \varepsilon^{\nu+\frac{1}{2}}}{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot r^{\frac{1}{2}}}$$

Після визначення параметра ε і, підставляючи його в формулу $\eta_1 = b\varepsilon^\nu$ [12], знаходимо відносну площу фактичного контакту:

$$\eta_1 = \left\{ \frac{2,35 \cdot b^{2\nu} \cdot r^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - \mu^2) \cdot N}{2^{2\nu} \cdot K_2 \cdot h_{\max}^{\frac{1}{2}} \cdot E \cdot A_c} \right\}^{\frac{2\nu}{2\nu+1}} \quad (4)$$

В отриманих формулах b і ν — коефіцієнти, що характеризують криву опорної поверхні; r — радіус кривизни вершин виступів; h_{\max} — максимальна висота нерівностей; E — модуль Юнга; μ — коефіцієнт Пуассона; A_c — контурна площа; K_2 — коефіцієнт, що залежить від ν .

Коефіцієнт K_2 знаходиться приблизним рішенням інтеграла і має наступні значення:

$$\begin{aligned} \text{при } \nu = 1 & \quad K_2 = 1, \\ \text{при } \nu = 2 & \quad K_2 = 0,8, \\ \text{при } \nu = 3 & \quad K_2 = 0,68, \end{aligned}$$

Як видно із формули (4), відносна площа дотику при пружному контакті пропорційна радіусу виступів r , питомому контурному навантаженню $q_c = \frac{N}{A_c}$ і зворотно пропорційна модулю пружності E , максимальній висоті нерівностей h_{\max} і параметрам b, ν і K_2 , що характеризують геометричну форму поверхні.



Контурна площа контакту може мати самий різноманітний характер. За формулою Герца, для однієї сфери контурна площа дорівнює

$$A_{C1} = C_1 \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot N_1^{\frac{2}{3}}$$

де: A_{C1} — контурна площа, що приходиться на одну хвилю; N_1 — нормальне навантаження на одну хвилю; C_1 — константа матеріалу; R — радіус округлення хвилі.

Якщо хвилі мають однакову висоту і розташовані з постійною щільністю, то уся контурна площа для m сферичних хвиль буде дорівнювати

$$A_c = m \cdot A_{C1} = C_1 \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot N_1^{\frac{2}{3}}$$

Тобто, контурна площа пропорційна кореню кубічному із числа контурних площадок.

Отримані вирази, хоча вони і можуть бути застосовані тільки до випадку регулярного розташування хвиль, дозволяють і в загальному випадку якісно оцінити вплив геометричних параметрів та навантаження на площу фактичного контакту.

Таким чином, можна проаналізувати вплив зусилля притиску на величину фактичної площі контакту. Результати розрахунків, виконані з використанням наведених залежностей, представлені на рис. 5.

На рис. 6. представлені результати розрахунку середньої величини зазору в місці контакту при зміні навантаження. Як видно з рис. 5 і 6, навіть при досить істотних зусиллях притиску, близьких до межі текучості, не вдається домогтися як істотного збільшення фактичної площі контакту, так і виключення зазору в контакт. Отже, збіль-

шення зусилля притиску притискачів до поверхні виробів, що зварюються, з метою підвищення тепловідвідних характеристик, не дає позитивного ефекту. Фактична площа контакту не перевищує 8%, а наявність зазору виключає теплопередачу в цій зоні контакту.

Як уже відзначалося, оброблені поверхні мають у більшості випадків хвилястість, наявність якої приводить до того, що плями фактичного контакту групуються в межах контурних площадок з радіусом r_k , утворених унаслідок деформації хвиль. У цьому випадку термічний опір (величина зворотна термічній провідності) фактичного контакту можна представити у вигляді суми:

$$R_M = \frac{\pi r_k \psi_1(\eta_k)}{2\lambda_M \eta_k} + \frac{\pi r_k \psi_2(\eta_\phi)}{2\lambda_M \eta_\phi} \quad (5)$$

де перший доданок являє собою термічний опір, що виникає при "стягуванні" теплового потоку до ділянок контурної площі, а другий доданок — термічний опір, що виникає при "стягуванні" теплового потоку до плям фактичного контакту, що знаходяться в межах контурних площадок.

Для розрахунку контактної термічної опору необхідно знати відносні площі контакту η_k і η_ϕ , середній радіус r_k контурної площадки і середній радіус r_ϕ плями фактичного контакту. Зазначені геометричні характеристики можуть бути визначені по формулах, наведених у роботі [9].

Геометричні параметри η_k і r_k контурної площі контакту двох хвилястих поверхонь визначаються за умови пружного деформування мікроступів по формулах:

$$\eta_k = \left(\frac{2.94 \cdot I \cdot J_B^{0.5} \cdot p_k}{H_{B,2}^{0.5}} \right)^{0.8} \quad (6)$$

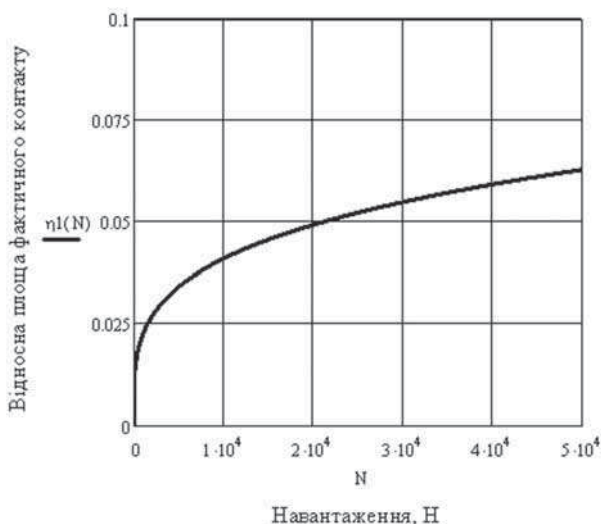


Рис. 5. Залежність відносної площі фактичного контакту від навантаження

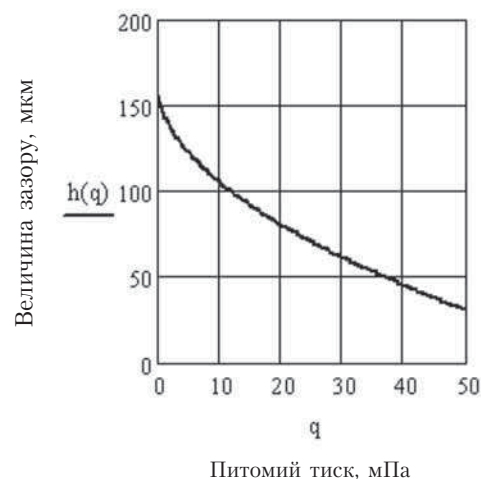
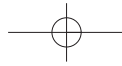


Рис. 6. Залежність величини зазору між контактуючими поверхнями від навантаження



$$r_k = \frac{1}{\pi^{0.5}} \sqrt{0.39 L_{\text{прод}} L_{\text{поп}} \left(\frac{J_B^{0.5} P_k}{H_{B_{1,2}}^{0.5}} \right)^{0.4}} \quad (7)$$

де $H_{B_{1,2}} = H_{B_1} + H_{B_2}$ — сума середніх значень висоти хвиль контактуючої пари; $L_{\text{прод}}$ і $L_{\text{поп}}$ — поздовжній і поперечний кроки хвиль.

При пружному контакті мікроступів для визначення параметрів η_ϕ і r_ϕ можна використовувати наступні залежності:

$$\eta_\phi = \left(\frac{2.35b \frac{1}{2v} J_{III}^{\frac{1}{2}}}{2^{2v} K_3 H_{\max}^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2v}{2v+1}} \left(\frac{2.94 J_B^{\frac{1}{2}}}{H_{B_{1,2}}^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{4}{10v+5}} (I p_k)^{\frac{10v+4}{10v+5}} \quad (8)$$

$$r_\phi = \left[\frac{K_1 r_k^2}{2^{2v-1}} \left(\frac{2.35 J_{III}^{\frac{1}{2}}}{K_3 H_{\max}^{\frac{1}{2}} b} \right)^{\frac{2}{2v+1}} \left(\frac{H_{B_{1,2}}}{2.94 J_B^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{8}{10v+5}} (I p_k)^{\frac{2}{10v+5}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Геометричні параметри контакту r_k , r_ϕ , η_k і η_ϕ розраховуються по формулах (6–9).

Термічна провідність фактичного контакту хвилястих поверхонь може бути записана у вигляді:

$$\alpha_m = \frac{2\bar{\lambda}_m}{\pi} \frac{\eta_k \eta_\phi}{\eta_\phi r_k \psi_1 + \eta_k r_k \psi_2}$$

При контактуванні поверхонь з макровідхиленнями можливо таке формування контакту, при якому ділянки контурної площі контакту будуть являти собою рівнобіжні смуги, у межах яких розташовані плями фактичного контакту. Так можуть контактувати окремі клавіші, які складають притискач.

У тому випадку, коли теплопередача в зоні контакту здійснюється через ділянки у вигляді рівнобіжних смуг шириною $2C_\phi$, розташованих із кроком, рівним $2C_0$, (див. рис. 3, в), температурне поле можна визначити по формулах двомірного періодичного контакту [15]:

$$T = T_k \pm \frac{C_0 q}{\pi \lambda_m} \operatorname{arch} \sqrt{\frac{f_1 + f_2 + 1}{2} + \sqrt{\frac{f_1 + f_2 + 1}{2} - f_1}} \quad (10)$$

де

$$f_1 = \left[\frac{ch(\pi x) \cos(\pi y) + \cos^2\left(\frac{\pi C_\phi}{2 C_0}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi C_\phi}{2 C_0}\right)} \right]^2$$

$$f_2 = \left[\frac{sh(\pi x) \sin(\pi y)}{\sin^2\left(\frac{\pi C_\phi}{2 C_0}\right)} \right]$$

Якщо напрямком теплового потоку збігається з позитивним напрямком осі "v", то другий доданок у формулі (10) в області $y < 0$ береться зі знаком "плюс", а в області $y > 0$ — зі знаком "мінус".

Термічна провідність двомірного періодичного контакту може бути розрахована по формулі:

$$\alpha_m = \frac{\pi \bar{\lambda}_m}{4C_0 \left| \ln \sin\left(\frac{\pi C_\phi}{2 C_0}\right) \right|} \quad (11)$$

Слід зазначити, що при розрахунку геометричних параметрів r_k , r_ϕ , η_k і η_ϕ , що входять у вирази для величин α_m і R_M , приходиться вибирати деякі середні значення ряду характеристик, таких як параметри кривої опорної поверхні, крок і висота хвиль для даного виду обробки і класу чистоти і т. ін. (див. формули (6–9) [9, 16–19]).

При відсутності необхідних відомостей про рельєф контактуючих поверхонь, для розрахунку термічної провідності фактичного контакту доцільно скористатися критеріальними рівняннями, отриманими при узагальненні експериментальних даних з використанням мінімального числа геометричних характеристик поверхонь. Такою характеристикою, яка широко використовується на практиці, є середня висота мікроступів шорсткості. Клас чистоти поверхні для заданого типу з'єднань, як правило, завжди відомий і задається в кресленнях деталей, у той час як характеристики хвилястості зазвичай не задаються. Клас чистоти поверхні тим вище, чим величина і кількість шорсткостей і нерівностей менше. Одержані при цьому, в результаті критеріальної обробки експериментальних даних узагальнені залежності, віддзеркалюють рівень контактної термічної провідності, що відповідає деяким усередненим значенням неврахованих характеристик (наприклад, хвилястості поверхонь).

Аналіз теорії дає нам можливість зв'язати термічну провідність із площею фактичного контакту і з кроком між цими площами (формула 11).

На підставі формули (11), були отримані залежності термічної провідності α_m від площі фактичного контакту C_ϕ та кроку C_0 між площами фактичного контакту (рис. 7, 8).

Як видно з рисунків, більш істотний вплив на величину термічної провідності оказує не площа фактичного контакту, а крок контактуючих площ. Причому, як видно з рис. 8, реальне збільшення



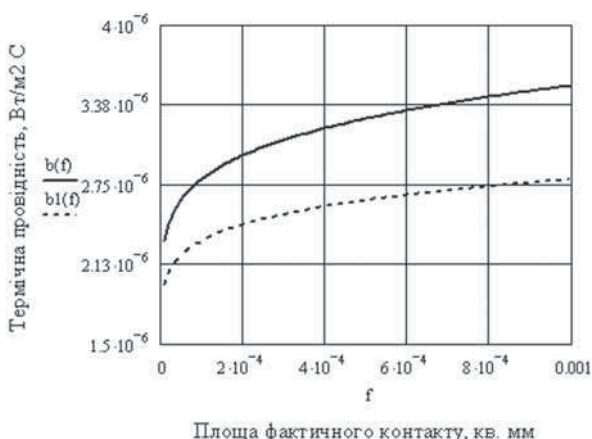


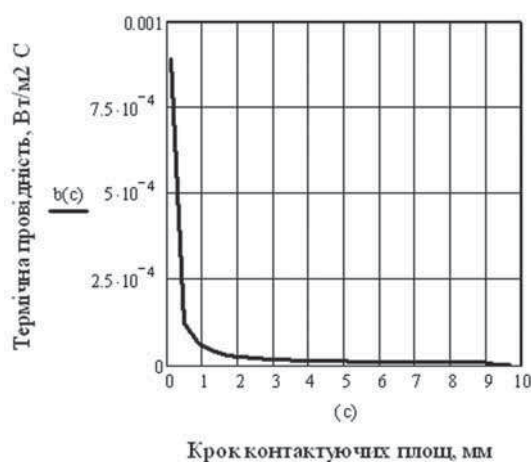
Рис. 7. Залежність термічної провідності від площі фактичного контакту при кроці між контактуючими площами:
10 мм – сплошна лінія; 100 мм – переривчаста лінія

термічної провідності починається лише при значеннях кроку, рівного 1,5–2 мм. (рис. 8, *a*). При зменшенні кроку від 2 до 0,3 мм термічна провідність збільшується практично на порядок (рис. 8, *b*). Це означає, що для того, щоб притискний елемент виконував тепловідвідні функції, необхідно, щоб контактуючі області розташовувалися на відстані одна від іншої не більш, ніж 0,5–1,0 мм. В іншому випадку термічна провідність настільки мала, що говорити про тепловідвідні властивості притискача не доводиться. Забезпечити такі умови контактування можна, використовуючи притискач у вигляді набору пластин товщиною δ , розміщених на одній осі (рис. 9, *a*).

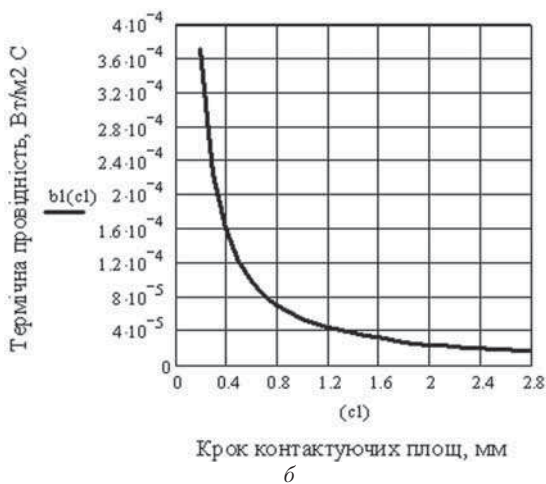
Товщина пластин δ , що складають такий притискач, для реальних умов практичного використання повинна бути не більш 0,5–0,6 мм. Притискання кожної пластини притискача до поверхні виробу може здійснюватись за допомогою гумової стрічки, яка розміщується на верхній поверхні притискача. У цьому випадку, навіть при наявності макронерівностей, кожна з пластинок буде зберігати контакт із поверхнею матеріалу, що зварюється, і ці зони контакту будуть розташовуватись з кроком, рівним товщині пластинок δ , або 2δ (рис. 9, *b*). При цьому термічна провідність такого притискача буде в 5–6 разів вища, ніж у звичайного клавішного притискача.

Висновки

Використовувати при притисканні тонколистових матеріалів великі зусилля недоцільно, бо збільшення навантаження на контакт не дозволяє суттєво підвищити площу фактичного контакту і не дає можливості уникнути зазору між контактуючими поверхнями.



a



b

Рис. 8. Залежність термічної провідності зони контакту від кроку контактуючих площ
a – загальна залежність;
b – залежність в зоні малих значень кроку

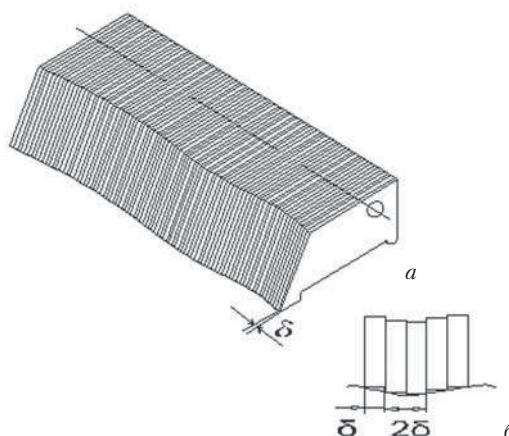


Рис. 9. Гнучкий притискач:
a – загальний вигляд;
b – схема можливого розташування елементів (пластин) притискача на поверхні виробу

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ, МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ



Крок між площами фактичного контакту викликає зміну величини термічної провідності в досить широкому діапазоні.

Реальні тепловідвідні функції притискача можуть бути реалізовані при значеннях кроку між клавішами, що не перевищуватимуть 1 мм.

Розроблена конструкція притискача з підвищеною інтенсивністю відводу теплоти із зони зварювання, який представляє собою набір мідних пластинок завтовшки 0,5–0,6 мм, розташованих на одній вісі. Термічна провідність такого притискача значно перевищує можливості звичайних традиційних клавішних притискачів.

Література

1. *Жданов И.М., Медко Б.В., Лысак В.В.* Автоматическая аргодуговая сварка тонколистовых изделий. — Автоматическая сварка, 1995. — № 10. — С. 32–35.
2. *Жданов И.М., Лысак В.В., Шилов А.П., Бойченко В.А.* Уменьшение направленным теплоотводом остаточных деформаций при сварке тонколистовых изделий. — Автоматическая сварка, 1981. — № 2. — С. 41–42.
3. *Жданов И.М., Медко Б.В., Лысак В.В., Нифантов В.Н.* Повышение точности стыковых соединений при сварке с принудительным теплоотводом. — Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве. — Тезисы докл. — Челябинск, 1986. — С. 291–292.
4. *Елин Л.В.* Взаимное внедрение поверхностных слоев металлов как одна из причин изнашивания при несовершенной смазке. — Сб. Трение и износ в машинах. т. 4., Изд. АН СССР, 1949.
5. *Крагельский И.В.* Площадь касания шероховатых поверхностей. — Сб. Электрические контакты., Труды совещания (26–28 ноября 1956 г.) — М.: Госэнергоиздат, 1957.
6. *Айбиндер С.Б.* Исследование трения и сцепления твердых тел (обзор работ). — Объединенный
- ученый совет отделения физики и технических наук. Рига, АН Латв. ССР, 1966. — 78 с.
7. *Мальков В.А., Фаворский О.Н., Леонтьев В.Н.* Контактный теплообмен в газотурбинных двигателях и энергоустановках. — Москва: Машиностроение, 1978.
8. *Шлыков Ю.П.* Исследование контактного теплообмена. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Изд. ЦКТИ им. Ползунова, Л., 1965. — 17 с.
9. *Демкин Н.Б.* Контактное шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970. — 228 с.
10. *Тимошенко С.П.* Сопrotивление материалов. — ОНТИ, 1946.
11. *Archard I.F.* Proc. Roy. Soc. V.243, No 1233, ser.A, 1957. — p. 190.
12. *Крагельский И.В., Демкин Н.Б.* Определение фактической площади касания. — В сб. Трение и износ в машинах. т. 14, АН СССР, Институт Машиноведения, 1960.
13. *Журавлев В.А.* К вопросу о теоретическом обосновании закона Амонтона-Кулона для трения несмазанных поверхностей. — Ж. Техн. физики, 1940. — № 10. — вып 17.
14. *Крагельский И.В.* Трение покоя двух шероховатых поверхностей. — Изв. АН СССР, 1948. — № 10.
15. *Мальков В.А.* К вопросу о контактном термическом сопротивлении в условиях вакуума. — Инженерно-физический журнал, 1969. — т. 17. — № 5. — С. 951–957.
16. *Билик Ш.М.* Макрогеометрия деталей машин. — М.: Машиностроение, 1973. — 344 с.
17. *Дьяченко Л.Е., Толкачева Н.Н., Андреев Г.А.* и др. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей. — М.: Наука, 1963. — 96 с.
18. *Крагельский И.В.* Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1968.
19. *Рыжов Э.В.* Геометрические характеристики шероховатости и волнистости В. кн.: Новое в теории трения. — М.: Наука, 1966, — с. 19.