

ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ КОНТАКТІВ НА НАГРІВ АЛЮМІНІЄВИХ ПЛАСТИН У НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ РОЗІГРІВУ ЗА ДОПОМОГОЮ СВС-ПРОЦЕСУ

А.І. Устїнов, М.В. Кулініч, С.Г. Косінцев

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Температура нагрівача, за допомогою якого можна приєднати пластину обмеженого розміру до оболонки необмеженого розміру методом паяння, у загальному випадку визначається температурою плавлення припою та характеристиками теплопередачі в зоні контакту між пластинами. У випадку низької теплопередачі в зоні контакту її розігрів до необхідної для паяння температури ускладнюється внаслідок розтікання тепла, що надходить, в оболонку. У роботі експериментально досліджено вплив неідеальних теплових контактів між алюмінієвими пластинами на їх нагрівання за допомогою плоского нагрівача, що контактує з однією з пластин. Виявилось, що сила притискання контактуючих пластин одна до одної більш ефективно впливає на теплопередачу в зоні контакту, ніж шорсткість поверхонь. При цьому величина коефіцієнта ефективної теплопередачі в процесі нагрівання пластин стрибкоподібно змінюється, що пов'язується з мікропластичною деформацією їхніх поверхневих шарів під дією навантаження стиснення. Запропоновано розрахунково-експериментальний метод самоузгодженого визначення значень коефіцієнта ефективної теплопередачі для різних температур, який базується на порівнянні експериментально вимірених та розрахованих термограм нагрівання пластин. Бібліогр. 11, рис. 6.

Ключові слова: температурні поля, нестационарний процес нагрівання, теплові контакти, паяння, багатошарові фольги

Вступ. Ремонт оболонкових конструкцій великого розміру можна здійснювати накладанням латки, що приєднується в процесі паяння за допомогою локального нагрівання зони з'єднання плоским нагрівачем, що контактує з накладкою (рис. 1). Передбачається, що параметри нагрівача (температура, маса, тощо) повинні забезпечити плавлення припою в зоні з'єднання пластин без оплавлення накладки, що контактує з ним [1].

Відповідну схему паяння в умовах стаціонарного нагрівання зони з'єднання нагрівачем із постійною температурою проаналізовано в роботах [2, 3] для ремонту трубопроводів в умовах космосу. При вирішенні цієї задачі припускали, що теплові контакти між елементами системи, що складається з труби, накладки, припою та нагрівача, ідеальні. Показано, що така схема паяння може забезпечити локальне нагрівання зони з'єднання до температури плавлення припою за умови, що температура нагрівача перевищує деяку граничну величину, конкретне значення якої залежить від масогабаритних параметрів збірки. Однак застосування такої схеми паяння передбачає використання потужних джерел електроживлення для запобігання розтіканню тепла по трубі в процесі нагріву.

Потужні джерела тепла, що використовуються для паяння, можна замінити хімічним джерелом тепла на основі багатошарової фольги (БФ), що складається з високореакційних елементів, та-

ких як нікель та алюміній. При ініціюванні в такій фользі реакції самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС), утворення інтерметалідної сполуки супроводжується інтенсивним виділенням тепла, що забезпечує розігрів нагрівача до адіабатичної температури СВС реакції за короткий період часу. У разі використання багатошарових фольг Ni/Al розігрів нагрівача до температури ~ 1800 К може відбуватися за долі секунди [4].

Потужність нагрівача очевидно пропорційна масі реакційного матеріалу в багатошаровій фользі, а також і її товщині. Змінюючи масу (або товщину) БФ в нагрівачі, можна забезпечувати необхідні температурні умови для паяння на поверхні оболонки необмеженого розміру. Знайдено [1], що в наближенні ідеальних теплових контактів є оптимальна товщина БФ для реалізації

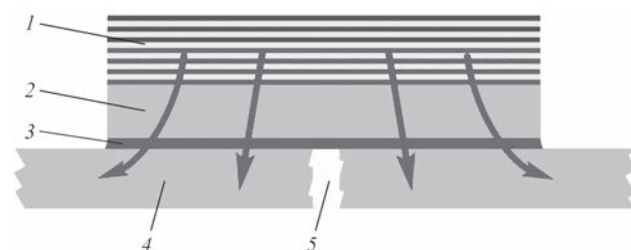


Рис. 1. Схематичне зображення ремонту оболонки методом паяння при локальному нагріванні зони з'єднання плоским нагрівачем (у нестационарних умовах): 1 – нагрівач; 2 – накладка; 3 – припій; 4 – оболонка; 5 – отвір (стрілки відображають поширення теплової енергії (умовно))

процесу паяння. У нашому випадку, коли треба забезпечити велику потужність, і нагрівач збирається не з однієї, а з кількох фольг, контроль товщини стає проблематичним і краще спиратися саме на загальну масу реакційного матеріалу. При масі нагрівача менше оптимальної, у зоні з'єднання не досягається температура плавлення припою. Якщо маса нагрівача перевищує оптимальну, може відбуватися оплавлення накладки, яка контактує з ним.

Оскільки температура в зоні з'єднання визначається балансом теплових потоків від нагрівача в накладку та від неї через припій в оболонку, то температура припою та час його плавлення, у свою чергу, визначатиметься не тільки теплофізичними характеристиками матеріалів елементів системи (нагрівача, пластин та припою), а й характеристиками теплових контактів між ними. На відміну від теплофізичних характеристик матеріалів, характеристики теплових контактів невідомі априорі й можуть змінюватися в широких межах залежно від низки факторів. Відомо, що опір поширенню теплового потоку в контакті між двома плоскими пластинами, притиснутими одна до одної, обумовлений головним чином неідеальним приляганням їхніх поверхонь [5, 6]. Тепловий обмін між пластинами в умовах вакууму за відносно низької температури в зоні контакту (нижчою ніж 1000 К), коли теплопередачею випромінюванням та конвекцією можна знехтувати, буде визначатись головним чином площею поверхні фізичного контакту пластин, яка залежить від рельєфу їхньої поверхні.

При стисканні пластини у точках контакту, в яких навантаження перевищує межу плинності матеріалу, відбуватиметься локальна пластична деформація виступів, що приведе до збільшення площі фізичного контакту пластин, а отже, до зменшення опору поширенню теплового потоку.

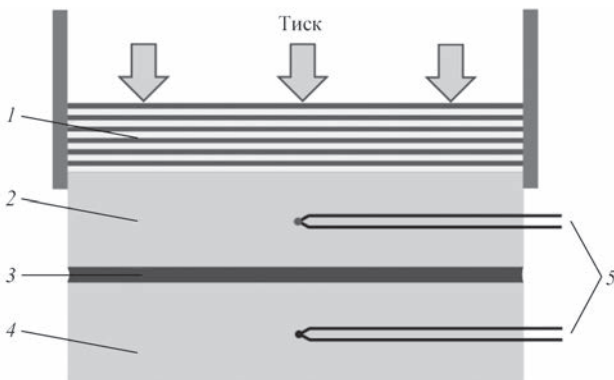


Рис. 2. Схематичне зображення збірки, що використовувалась для експериментального дослідження температурних полів у процесі паяння алюмінієвих пластин АМгб (2, 4), розділених прошарком припою (3), при нагріванні за допомогою нагрівача з багатошарових фольг (1), що контактує з пластиною-накладкою (2); 5 – термопари, введені у пластини.

Отже, теплопровідність у зоні контакту залежить не лише від шорсткості поверхонь, що контактують, але й від сили їх притискання та механічних властивостей матеріалів, що контактують. Крім того, оскільки межа плинності матеріалу в загальному випадку залежить від температури, слід очікувати зміни характеристик теплового контакту при нагріванні навіть за постійного зусилля стискання.

У роботі на прикладі модельної системи, яка складається з плоского нагрівача, який контактує з пластинами АМгб, досліджено зміну температури в пластинах у процесі їх нестационарного нагріву залежно від шорсткості поверхні та зусилля їх притискання.

Методика проведення експериментів. Схема вимірювання температури в пластинах АМгб у процесі нагрівання показана на рис. 2.

Пластини з алюмінієвого сплаву АМгб розміром $50 \times 50 \times 5$ мм вирізались з листа, після чого їх контактні поверхні шліфувались для забезпечення теплового контакту по всій площині. Їх розміщували в притискному пристрої одна над одною. Над верхньою пластиною поміщали нагрівач – пакет БФ Ni/Al, який контактує з нею по всій площині. Для вивчення впливу шорсткості на теплопередачу в зоні контактів було підготовлено пластини, контактні поверхні яких попередньо обробили за допомогою шліфувального паперу до досягнення показників шорсткості 0,3 та 2,5 мкм, які визначались по зернистості використаного паперу. Притискання цієї збірки забезпечувала пружина, яку розміщували над нагрівачем і стискали до заданого значення навантаження, керуючись показниками тензодатчика, розміщеного під нижньою пластиною.

Для моделювання з'єднання пластин методом паяння на поверхню пластини-накладки, яка контактує з нижньою пластиною-оболонкою, методом електронно-променевого осадження наносили шар припою Al-Si завтовшки 100 мкм. Реакцію СВС у БФ Al/Ni ініціювали шляхом подачі імпульсу струму від попередньо зарядженого конденсатора на ніхромову спіраль, яка локально розігрівала БФ в місці контакту. Висока швидкість поширення реакції СВС у БФ (1...2 м/с) забезпечувала швидкий розігрів нагрівача до адіабатичної температури реакції синтезу інтерметаліду NiAl. Зміну температури в пластинах у часі вимірювали за допомогою термопар ХА з діаметром дроту 0,15 мм. Термопари в керамічній ізоляції заводилися в канали діаметром 2,5 мм просвердлені в пластинах так, що їх спаї опинялися в центрі пластин притиснені до них. Вважалося, що інерційністю термопар для даних процесів можна знехтувати. Показники термопар записувалися на

ПК за допомогою контролера із частотою запису 1 кГц. Для зменшення теплових втрат і конвекційного теплообміну між елементами системи збірки поміщали у вакуумну камеру (залишковий тиск $\sim 0,1$ Па).

Методика чисельного моделювання температурних полів. Чисельне моделювання температурних полів виконано в припущенні, що всі елементи системи (нагрівач, пластини АМГб) мають необмежені розміри в площині з'єднання пластин і обмежений розмір у перпендикулярному напрямку. У цьому випадку задача зводиться до аналізу перерозподілу тепла в одному напрямку, перпендикулярному до площини контакту. Відповідно, усі елементи розбивались на шари кінцевої товщини Δx . Припускали, що випромінювання теплової енергії за межами системи відсутнє, а отже для крайніх шарів (0-ї і N_{\max}) виконуватимуться граничні умови другого роду:

$$T_0 = T_1, T_{N_{\max}} = T_{N_{\max}-1}, \text{ де } N_{\max} - \text{максимальний номер шару: } N_{\max} = \frac{L_0}{\Delta x} + \frac{L_1}{\Delta x} + \frac{L_2}{\Delta x} + 2, \text{ де } L_0 - \text{товщина}$$

нагрівача; L_1 – товщина накладки; L_2 – товщина оболонки. Прошарок на основі припою розглядали як один шар.

Для визначення температури в кожному шарі необхідно розв'язати, з урахуванням теплофізичних властивостей матеріалів шару, рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності ($\text{м}^2/\text{с}$) для матеріалу шару.

Рівняння (1) має розв'язок для всіх шарів системи шириною Δx :

$$T_i = T_i^{\text{old}} + a_i \frac{T_{i+1}^{\text{old}} - 2T_i^{\text{old}} + T_{i-1}^{\text{old}}}{\Delta x^2} dt, \quad (2)$$

де T_i^{old} – вихідна температура i -го шару, а T_i – його температура через час dt секунд.

Це співвідношення справедливе для всіх шарів, окрім тих, які належать до різних елементів системи. Для розрахунку температури граничних шарів вважали, що тепловий потік пропорційний різниці температур у граничних шарах i та $i+1$, перенесення тепла між якими характеризується «коефіцієнтом ефективної теплопередачі» $\mu_{i,i+1}$ відповідно до співвідношення

$$J_{i,i+1} = \mu_{i,i+1} (T_{i+1} - T_i), \quad (3)$$

де $J_{i,i+1}$ – тепловий потік між шарами i та $i+1$, температури яких T_i та T_{i+1} , відповідно.

У випадку ідеального теплового контакту між шарами i та $i+1$, що належать до різних елементів системи з коефіцієнтами теплопровідності їхніх

матеріалів k_i, k_{i+1} та товщинами h_i, h_{i+1} ; відповідно, коефіцієнт ефективної теплопередачі визначали як

$$\mu_{i,i+1} = \frac{2k_i k_{i+1}}{k_i h_{i+1} + k_{i+1} h_i}. \quad (4)$$

Отже, для визначення температури сусідніх шарів застосовували системи рівнянь, що включають рівняння типів (2) і (3) для теплових потоків між граничними та сусідніми до них шарами [7], а коефіцієнти теплопередачі задавали апіорі для неідеальних контактів або розраховували за формулою (4) у випадку ідеальних контактів. Чисельна реалізація цього алгоритму дає змогу розраховувати розподіл температури за товщиною системи для будь-якого моменту часу t або зміну температури в заданій точці залежно від часу. За початок відліку часу приймали момент завершення реакції СВС у БФ, коли температура нагрівача досягає адіабатичної температури високотемпературного синтезу інтерметаліду NiAl. Враховуючи, що швидкість поширення фронту реакції СВС становить $\sim 1...2$ м/с, теплообміном між нагрівачем і пластиною нехтували. Також вважали, що теплофізичні характеристики елементів системи (температуропровідність і теплоємність матеріалів нагрівача і пластин) не залежать від температури. За наявності припою між пластинами він враховувався як окремий прошарок з власними теплофізичними властивостями, які визначались відповідно до його хімічного складу. Особливості врахування шару припою між пластинами детально описано в [8].

Результати дослідження та їх обговорення.

На рис. 3, а представлено термограми зміни температури пластин із різною шорсткістю. Стискання в зоні з'єднання становило 60 кПа. Видно, що температура накладки різко й немонотонно зростає після ініціювання реакції СВС у БФ. Хоча нагрівач швидко розігрівається до температури 1700 К і вище, оплавлення пластин, що контактують з ним, не спостерігалось. Це зумовлено високою теплопровідністю алюмінієвих сплавів, через яку тепла енергія відводиться від зони контакту настільки швидко, що локального перегріву вище температури плавлення в зоні контакту не відбувається. Таке розплавлення може спостерігатися лише при значному перегріві збірки, коли температура плавлення досягається для пластини як одного цілого, а не лише в зоні контакту. Розігрів другої пластини («оболонки») відбувається з певною затримкою, причому «відставання» зростання температури в ній збільшується зі збільшенням шорсткості контактних поверхонь пластин. Очевидно, таке відставання зумовлене гіршим теплообміном у зоні контакту

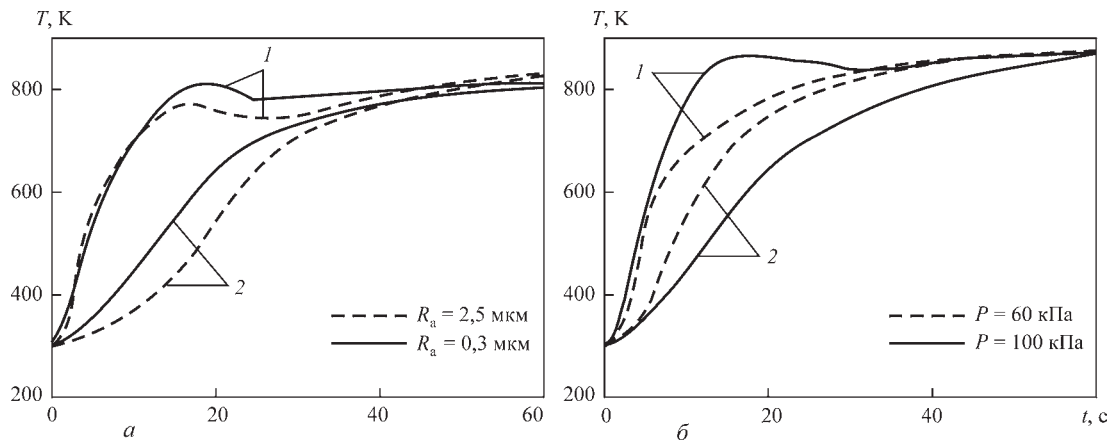


Рис. 3. Вплив шорсткості поверхні пластин при постійному тиску 60 кПа (а) та при постійній шорсткості $R_a = 0,3 \text{ мкм}$ (б) на зміну температури в процесі їх нагрівання: 1 – накладка; 2 – пластина-«оболонка»

пластин внаслідок зменшення ефективної площі теплового контакту.

Збільшення тиску при незмінній шорсткості контактних поверхонь пластин (рис. 3, б) призводить до зменшення швидкості нагріву накладки й зростання швидкості нагріву оболонки, тобто, до зменшення різниці температур між накладкою та оболонкою в кожний момент часу, що свідчить про підвищення теплообміну в контактні між ними. Слід відзначити, що характер зміни температури накладки, зі збільшенням зусилля притискання, стає якісно іншим: за меншого зусилля притискання її температура спочатку різко зростає, а тоді дещо зменшується; за більшого зусилля – зміна її температури має більш монотонний характер. Деякі, відносно невеликі відмінності у формі кривих для $P = 60 \text{ кПа}$, $R_a = 0,3 \text{ мкм}$ пов'язані з похибками дозування нагрівача і відхиленнями хімічного складу фольги від середнього значення.

Оскільки немонотонність термограми нагріву верхньої пластини спостерігається за умови слабшої теплопередачі в контактні між пластинами, ми припустили, що в початковий момент нагрівання прикладеного тиску недостатньо для досягнення найкращого контакту між пластинами. Коли температура пластин підвищується, за того ж тиску,

досягається мікропластична деформація їхніх поверхневих шарів, що покращує прилягання контактних поверхонь, а отже й теплообмін.

Порівнюючи залежності температури елементів системи від часу, можна побачити (рис. 3, б), що перегини на термограмах накладки й оболонки, які вказують на зменшення швидкості нагріву першої та зростання швидкості нагріву другої, збігаються в часі, що є свідченням поліпшення теплового контакту між пластинами в цей момент. Виходячи з отриманих експериментальних результатів, ми дійшли висновку, що при нагріванні пластин АМг6 за допомогою БФ, яка контактує з накладкою, із накладанням постійного притискання в діапазоні 60...100 кПа досягаються умови, необхідні для пластичної деформації матеріалу в зоні контакту.

Для перевірки цього припущення проводили експерименти з нагрівання пластин АМг6, розділених нитками вольфраму завтовшки 0,3 мм для імітації «поганого теплового контакту» в стику на початку нагрівання (рис. 4, а). Отримані експериментальні термограми представлені на рис. 4, б. Видно, що спершу накладка нагрівається з високою швидкістю до певного моменту, після чого зростання її температури сповільнюється та на-

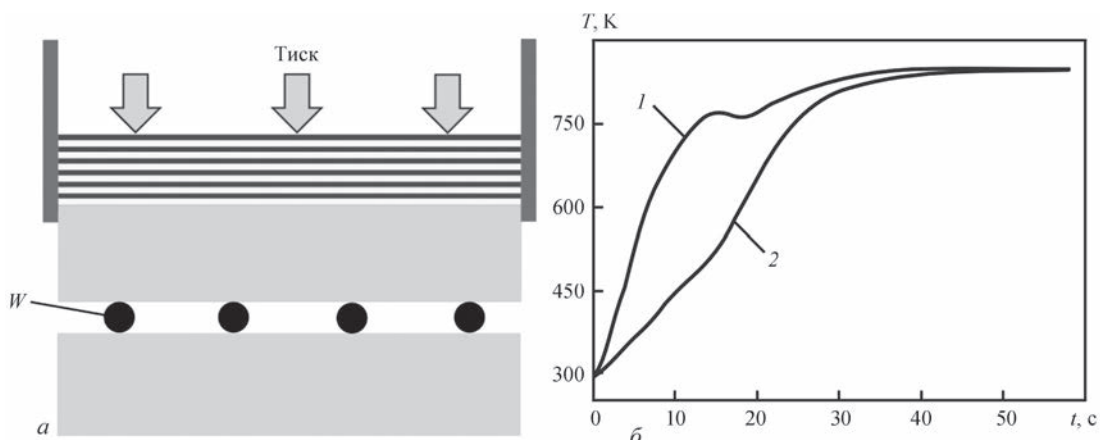


Рис. 4. Схема нагріву пластин (а), розділених нитками вольфраму (W) та експериментальна термограма нагріву пластин накладки (1) і «оболонки» (2), розділених тонкими вольфрамовими нитками, при постійному тиску 100 кПа (б)



Рис. 5. Поверхні пластини сплаву АМг6 після термічного циклу нагрівання в умовах їх стискання із зусиллям 100 кПа

віль відбувається невелике її зниження. У цей же момент часу на термограмі пластини-оболонки спостерігається вигин, який свідчить про збільшення швидкості її нагрівання.

Дослідження поверхонь пластин після завершення термічного циклу показало (рис. 5) наявність на них відбитків від тонких вольфрамових ниток, які розділяли ці поверхні до початку нагрівання, та які не спостерігалися за умови стискання такої ж збірки із тим же зусиллям, але без нагріву.

Поява відбитків свідчить про те, що при нагріванні пластин при постійному навантаженні досягаються умови пластичної деформації матеріалу пластин за рахунок зниження межі його плинності зі зростанням температури. Дійсно, дослідження залежності межі плинності від температури в алюмінієвих сплавах у роботах [9, 10] показали, що при нагріванні межа плинності може знижуватися в рази порівняно з межею плинності за кімнатної температури.

Отже, параметри теплопередачі в зоні контакту пластин при їх нагріванні в умовах постійного навантаження можуть змінюватися внаслідок досягнення умов пластичної деформації матеріалу пластин при нагріванні. Наслідком цього є суттєве зменшення швидкості нагрівання накладки, яка контактує з нагрівачем, і збільшення швидкості нагрівання оболонки. У деяких випадках підвищення

коефіцієнта теплопередачі на межі двох пластин у процесі їх нагрівання може приводити до появи на термограмі накладки «полички», аналогічної до тієї, яка спостерігається при плавленні матеріалу. Вірогідно, цей ефект обумовлений переходом від пружної деформації матеріалу поверхневих шарів пластин до їхньої пластичної текучості під дією прикладеного тиску за температури, за якої межа плинності матеріалу пластини знижується до рівня, який відповідає зусиллю стискання.

Зрозуміло, що якщо матеріал контактних поверхонь матиме меншу межу плинності, ніж сплав АМг6, температура такого переходу буде ще нижчою. Для перевірки цього припущення було проведено дослідження нагрівання пластин АМг6, коли одна з контактних поверхонь пластини-накладки була вкрита багатошаровим припоєм на основі AlSi. Виявилось (рис. 6), що температура зміни нахилу кривих на термограмах нижча, ніж при нагріванні пластин без припою. Пікові значення температури виявились меншими ніж в попередніх експериментах (рис. 3, а, б), що пов'язано з похибками у дозуванні маси нагрівача. Враховуючи, що температура плавлення припою AlSi складає ~ 850 К, при наближенні температури багатошарової фольги евтектичного складу до цієї температури в ній відбуваються структурні зміни, які впливають, головним чином, на механічну поведінку припою, а саме на його деформаційну поведінку під дією зусилля притискання, в результаті чого межа плинності багатошарового припою при нагріванні знижується, що може суттєво впливати на характеристики теплового контакту між пластинами [11].

Математичне моделювання температурних полів. Математичне моделювання температурних полів виконували з варіюванням коефіцієнтів ефективної теплопередачі в контактах між нагрівачем та накладкою ($\mu_{н,п}$) та між пластинами ($\mu_{п,п}$). Залежність (рис. 6, а, теор. 1) отримано в

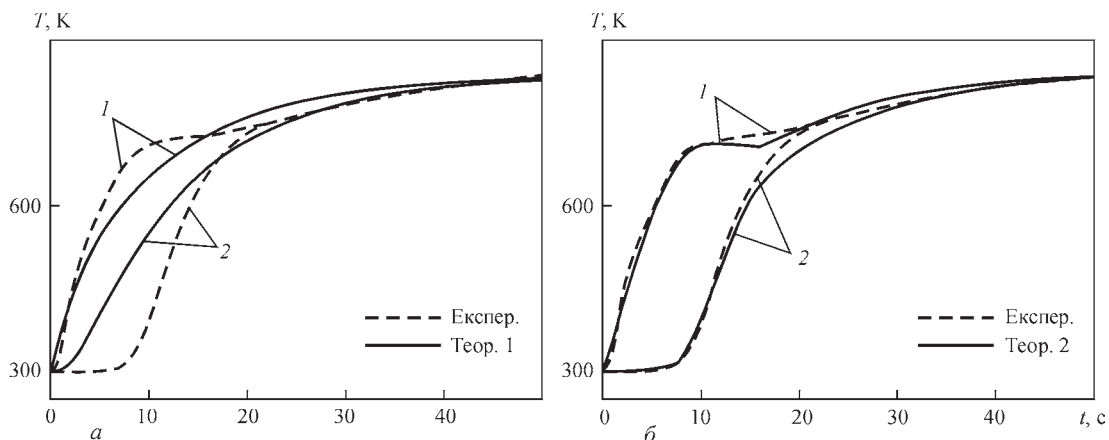


Рис. 6. Залежність температури в збірці пластин АМг6, розділених прошарком припою, від часу з моменту проходження реакції СВС в нагрівачі, в умовах постійного тиску 100 кПа для пластини-накладки (1) і пластини-«оболонки» (2). Штрихові лінії – результати експериментальних вимірювань; суцільні лінії – результати моделювання при постійних (а) та змінних (б) коефіцієнтах ефективної теплопередачі

припущенні, що в процесі нагрівання коефіцієнти теплопередачі в контактах залишаються постійними ($\mu_{\text{нп}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\mu_{\text{нп}} = 1 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), а залежність (рис. 6, б, теор. 2) – у припущенні, що коефіцієнт теплопередачі в зоні контакту пластин за температури 700 К зростає від $\mu_{\text{нп}} = 5 \cdot 10^4$ до $6,6 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при постійному значенні коефіцієнту ефективної теплопередачі в зоні контакту нагрівача та накладки ($\mu_{\text{нп}} = 9 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

Виявилось, що розраховані зміни температури при нагріванні пластин за умови, що коефіцієнти теплопередачі залишаються постійними (рис. 6, а, крива теор. 1), задовільно узгоджуються на початкових етапах тільки з експериментальними термограмами, отриманими для пластини, яка контактує з нагрівачем. На пізніших стадіях цього процесу спостерігається суттєве розходження розрахунку й експерименту.

Моделювання процесу нагрівання збірки за умови, що при досягненні певної температури накладки (700 К) відбувається зміна коефіцієнту теплопередачі в контакті між пластинами, забезпечило набагато ліпше узгодження між розрахованими та експериментальними термограмами (рис. 6, б, крива теор. 2).

Отже, для прогнозування умов плавлення припою у «відкритій» системі (приєднання пластини-накладки на оболонку великого розміру) за допомогою нагрівача із заданою кількістю тепла, необхідно знати не тільки теплофізичні параметри матеріалів (теплоємність, теплопровідність і т. д.) і товщини елементів системи, а також коефіцієнти теплопередачі в контактах між ними. З отриманих результатів видно, що ці коефіцієнти непостійні при зміні температури, що істотно ускладнює оцінку параметрів нагрівача. Використання експериментальних термограм та можливості чисельного моделювання нагріву пластин обмеженого розміру («лабораторні умови») дозволяє визначити коефіцієнти теплопередачі в контактах та температуру їх зміни (що відповідає межі плинності матеріалу пластин або припою при певному навантаженні) шляхом варіації цих параметрів для забезпечення найкращої відповідності між експериментальними та розрахованими значеннями температури пластин у процесі їх нагрівання. Отримані в процесі такого самоузгодженого розрахунку параметри теплових контактів можна використати в подальшому моделюванні процесу нагрівання зони з'єднання на поверхні оболонки «необмеженого» розміру (за умови такої ж шорсткості поверхонь, що контактують, і зусилля їх притискання) для визначення параметрів нагрівача, що забезпечують температурні умови, необхідні для паяння.

Висновки.

Встановлено, що ефективність теплопередачі в зоні контакту пластин АМгб в процесі їх нагріву плоским нагрівачем, який контактує з однією з них, залежить як від шорсткості поверхонь, що контактують, так і від зусилля стискання. Ефективність теплообміну збільшується при зменшенні шорсткості контактних поверхонь у діапазоні від 2,5 до 0,3 мкм і збільшенні тиску від 60 до 100 кПа. Поліпшення параметрів теплообміну при збільшенні тиску у процесі нагрівання пластин пов'язано з мікропластичною деформацією поверхневих шарів пластин, яка приводить до збільшення площі їх фізичного контакту.

Показано, що співставлення експериментально отриманих і розрахованих чисельним моделюванням термограм нагрівання пластин можна визначати коефіцієнти ефективної теплопередачі в зонах контакту між нагрівачем і пластиною-накладкою та між пластинами, а також температуру (інтервал температур) переходу від неідеального контакту між пластинами АМгб до ідеального їх контакту в умовах нестационарного нагрівання системи при постійно діючому тиску.

Список літератури

- Кулинич М.В., Запорожець Т.В., Гусак А.М., Устинов А.И. (2019) Расчет тепловых полей в процессе соединения алюминиевых пластин через промежуточные прослойки при локальном нагреве зоны соединения. *Автоматическая сварка*, 4, 10–15.
- Васенин Ю.Л., Загребельный А.А., Зельниченко А.Т. и др. (2001) Моделирование тепловых процессов при ремонте трубопроводов в условиях космоса. *Автоматическая сварка*, 4, 19–24.
- Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Сролаєв Г.В. (2017) Спеціальні способи зварювання. Підручник. (ред. Патон Б.Є.). Миколаїв, НУК.
- Weihs, T., Barmak, K., Coffey, K. (2014) Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications: Structure, Processing and Properties*, 40, 160–243.
- Попов В.М. (1971) *Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений*. Москва, Энергия.
- Лыков А.В. (1978) *Справочник по тепломассообмену*. Москва, Энергия.
- Безпальчук В.М., Запорожець Т.В., Кравчук М.В. та ін. (2015) Розрахунок теплових полів у багатофазній тривимірній системі при нестационарних умовах її нагрівання. *Вісник Черкаського університету*, 16 (349), 38–49.
- Кулинич М.В., Безпальчук В.Н., Косинцев С.Г. и др. (2018) Расчетно-экспериментальные исследование тепловых полей в нестационарном процессе пайки. *Автоматическая сварка*, 1, 22–28.
- Summers, P.T., Chen, Y., Rippe, C.M. et al. (2015) Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires. *Fire Science Reviews*, 4 (1), 1–36.
- Su, M.-N., Young, B. (2017) Mechanical properties of high strength aluminium alloy at elevated temperatures. *Ce/papers*, 2-3 (1), 2831–2839.
- Ustinov, A.I., Melnychenko, T.V., Demchenkov, S.A. (2021) Structural mechanism of plastic deformation of Al/a-Si multilayer foils at heating under load. *Materials Science & Engineering AA 810*, 141030.

References

1. Kulinich, M.V., Zaporozhets, T.V., Gusak, A.M., Ustinov, A.I. (2019) Calculation of thermal fields during joining aluminium plates through interlayers at local heating of the joint zone. *The Paton Welding J.*, **4**, 11-18.
2. Vasenin, Yu.L., Zagrebelny, A.A., Zelnichenko, A.Y. et al. (2001) Modelling of thermal process in piping repair in space. *The Paton Welding J.*, **4**, 18-23.
3. Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Yu., Iermolaev, G.V. (2017) Special methods of welding: Manual. Ed. by B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
4. Weihs, T., Barmak, K., Coffey, K. (2014) Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils. Metallic films for electronic, optical and magnetic applications: Structure, *Processing and Properties*, **40**, 160–243.
5. Popov, V.M. (1971) *Heat exchange in the zone of detachable and permanent joints*. Moscow, Energiya [in Russian].
6. Lykov, A.V. (1978) Reference book on heat-, mass exchange. Moscow, Energiya [in Russian].
7. Bezpachuk, V.M., Zaporozhets, T.V., Kravchuk, M.V. et al. (2015) Calculation of thermal fields in multiphase 3D system under nonstationary conditions of its heating. *Visnyk Cherkaskogo Un-tu*, **16** (349), 38–49 [in Ukrainian].
8. Kulinich, M.V., Bezpachuk, V.N., Kosintsev, S.G. et al. (2018) Calculation-experimental investigation of thermal fields in the process of nonstationary soldering. *The Paton Welding J.*, **1**, 14-19.
9. Summers, P.T., Chen, Y., Rippe, C.M. et al. (2015) Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires. *Fire Science Reviews*, **4** (1), 1–36.
10. Su, M.-N., Young, B. (2017) Mechanical properties of high strength aluminium alloy at elevated temperatures. *Ce/papers*, **2-3** (1), 2831–2839.
11. Ustinov, A.I., Melnychenko, T.V., Demchenkov, S.A. (2021) Structural mechanism of plastic deformation of Al/a-Si multilayer foils at heating under load. *Mater. Sci. & Engin. AA 810*, 141030.

INFLUENCE OF THERMAL CONTACTS ON HEATING ALUMINIUM PLATES UNDER NON-STATIONARY HEATING CONDITIONS, USING THE SHS-PROCESS

A.I. Ustinov, M.V. Kulinich, S.G. Kosintsev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The temperature of the heater, which can be used to join a plate of limited dimensions, to a shell of unlimited dimensions by brazing, in the general case is determined by melting temperature of the filler metal and characteristics of heat transfer in the plate contact zone. In the case of a low heat transfer in the contact zone, its heating to the temperature required for brazing is complicated, as a result of spreading of the heat coming into the shell. The work is an experimental study of the impact of nonideal thermal contacts between the aluminium plates on their heating, using a flat heater, which is in contact with one of the plates. It turned out that the force of pressing the contacting plates to each other has a greater effect on heat transfer in the contact zone than the surface roughness. Here, the value of the coefficient of effective heat transfer changes jumplike during heating of the plates, which is associated with microplastic deformation of their surface layers under the impact of a compressive load. A computational-experimental method of self-consistent determination of the values of the coefficient of effective heat transfer for different temperatures was proposed, which is based on comparison of experimentally measured and calculated thermograms of plate heating. 11 Ref., 6 Fig.

Keywords: temperature fields, nonstationary heating process, thermal contacts, brazing, multilayer foils

Надійшла до редакції 25.07.2023

НОВА КНИГА

«Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication»

Igor Ryabtsev, Serhii Fomichov, Valerii Kuznetsov, Yevgenia Chvertko, Anna Banin

Springer Nature Switzerland AG 2023, 226 p.

ISBN 978-3-031-34389-6, ISBN 978-3-031-34390-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2>

Передмова

Шановні колеги-зварники!

Сім'я зварників об'єднує мільйони фахівців, які працюють у всіх сферах сучасного виробництва на землі, під водою і в космосі.

Сьогодні зварювання належить до категорії найпопулярніших виробничих спеціальностей у Європі, Північній Америці, Азії, Латинській Америці, Австралії та Африці.

Зварювання та пов'язані з ним процеси є частиною найскладніших виробничих технологій, що базуються на основах механіки, електротехніки, фізичної хімії, матеріалознавства, прикладної математики, інформатики та робототехніки. Це вимагає високого рівня компетентності від усіх категорій тих, хто пов'язаний зі зварюванням: робітників, інженерів та науковців. Наукова та навчальна література зі зварювання постійно поповнюється. Ця серія підручників для міжнародних інженерів зі зварювання має на меті допомогти у вивченні основ фізики та технологій зварювання відповідно до вимог міжнародних стандартів та освітніх вимог Міжнародного інституту зварювання. Автори проілюстрували текст підручника та намагалися зробити його корисним для широкого кола спеціалістів, насамперед інженерів. Ми сподіваємося, що вступні частини розділів підручника також допоможуть зварникам на місці зрозуміти основи зварювання.

Бажаю вам, шановні колеги-зварники, творчих успіхів і ділових досягнень в оволодінні складною, сучасною і дуже захоплюючою наукою зварювання та пов'язаних з нею процесів.

Борис Патон
директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона
2000 р., Київ, Україна

