

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ПЛАСТИН З ТЕРМОЗМІЦНЕНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219-T81

О.В. Махненко, О.С. Міленін, В.І. Павловський, В.В. Савицький, Б.Р. Царик

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

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) – відносно новий процес зварювання, який вже отримав досить широке застосування для виконання з'єднань конструкцій в авіакосмічній галузі, транспортному та суднобудуванні. Вважається, що в порівнянні з традиційними дуговими процесами зварювання ЗТП забезпечує менший нагрів металу з'єднання та зниження рівня залишкових напружень і деформацій. У роботі досліджувались особливості розподілу залишкових напружень у стиковому ЗТП з'єднанні із термозміцненого алюмінієвого сплаву, що необхідно для прогнозування міцності та ресурсу зварних конструкцій. Побудовано математичну модель для визначення залишкових напружень при ЗТП, розглянуто врахування ефекту знеміцнення алюмінієвого сплаву при зварювальному нагріві на залишкові напруження. Порівняння розрахункових та експериментальних даних розподілу залишкових повздовжніх напружень у зразках, виконаних ЗТП, показало їх задовільний рівень відповідності. Показано, що визначений рівень залишкових розтягувальних напружень близький до границі текучості відпаленого металу. Бібліогр. 12, рис. 14.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, зварювання тертям з перемішуванням, стикове з'єднання, залишкові напруження, математичне моделювання, експериментальне вимірювання

Вступ. На сьогодні технологія зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) знаходить широке використання для виконання з'єднань різноманітних конструкцій в авіакосмічній галузі, транспортному та суднобудуванні, та ін. [1, 2]. Для прогнозування надійності, ресурсу, міцності та довговічності зварних конструкцій, виконаних ЗТП, актуальним завданням є визначення залишкових напружень і деформацій [3, 4]. Враховуючи, що процес впровадження ЗТП у промисловості розвинутих країн почався не так давно – кілька останніх десятиліть, то на теперішній час питання залишкових напружень і деформацій при ЗТП різних конструкційних матеріалів і сплавів ще недостатньо вивчене. Тобто немає загальноприйнятого уявлення про рівень максимальних значень і характер розподілу залишкових напружень і деформацій, а існуючі дані дуже часто є суперечливими. У роботі з цією метою були використані методи експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стикового з'єднання пластин із алюмінієвого сплаву 2219-T81 при зварювальному нагріві ЗТП [5], а також проведено порівняння отриманих розподілів залишкових напружень при ЗТП з результатами математичного моделювання.

Експериментальне вимірювання залишкових напружень при ЗТП. Було виконано експериментальне визначення залишкових напружень у зразках з'єднань із алюмінієвого сплаву 2219-T81, які були отримані з використанням технології

ЗТП. Вимірювання залишкових зварювальних напружень проводилося наступними методами:

1. Методом розрізування металу зварного з'єднання на вузькі повздовжні смужки (темплети) для звільнення в них внутрішніх напружень і вимірювання отриманих при цьому пружних деформацій (залишкових зварювальних повздовжніх напружень) [9]. Для цього використовувався механічний деформометр на базі 20 мм (рис. 1) і система конусних отворів, попередньо висвердлених на верхній і нижній сторонах зразка у поперечних перерізах у середній частині зразків. Вимірювання за допомогою механічного деформометра кожної вимірювальної бази (20 мм) проводились до і після повного розрізування зразків на темплети для повного звільнення залишкових напружень. Після цього був виконаний перерахунок отриманих даних пружних деформацій кожної вимірювальної бази в залишкові зварні напруження в заданій точці зразка. Для алюмінієвого сплаву 2219 у розрахунках використовувався модуль пружності $E = 75000$ МПа.

2. Методом отворів у поєднанні з реєстрацією переміщень, що виникають у результаті локальної релаксації напружень, за допомогою лазерної спекл-інтерферометрії (ESPI-HD метод) (рис. 2). Він не вимагає підготовки поверхні та може використовуватись для визначення залишкових напружень на базі 0,5...1,0 мм у діаметрі та завглибшки до 1 мм. Вимірювання виконувались у наступній послідовності: спекл-інтерферометр встановлювався на зварне

© Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Павловський В.І. – <https://orcid.org/0000-0002-5441-3447>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>, Царик Б.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-8929-7722>
О.В. Махненко, О.С. Міленін, В.І. Павловський, В.В. Савицький, Б.Р. Царик, 2024

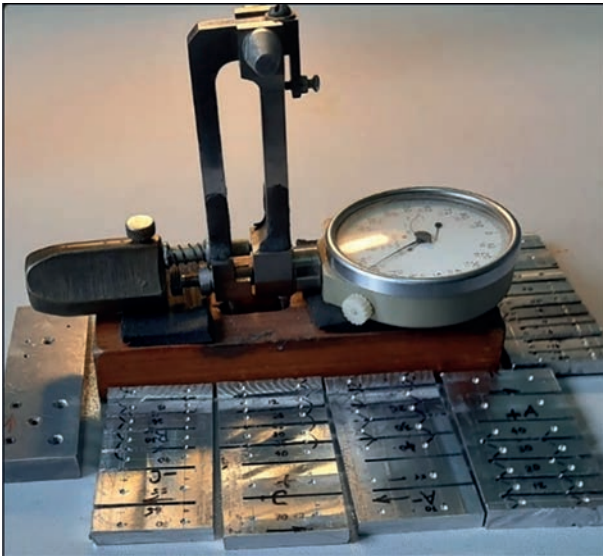


Рис. 1. Зовнішній вигляд механічного деформометра на базі 20 мм та вирізані частини зварного зразка (темплети) з вимірювальними базами (конусні отвори) для визначення залишкових напружень

з'єднання, після чого записувалися цифрові зображення, що характеризують початковий стан поверхні до свердління отвору. Після релаксації напружень, що викликана свердлінням некрізного отвору діаметром 1,0 мм і завглибшки 0,5 мм, записувався інший набір спекл-зображень, що відображали деформований стан. На основі отриманих зображень методом фазових кроків розраховувались значення переми-

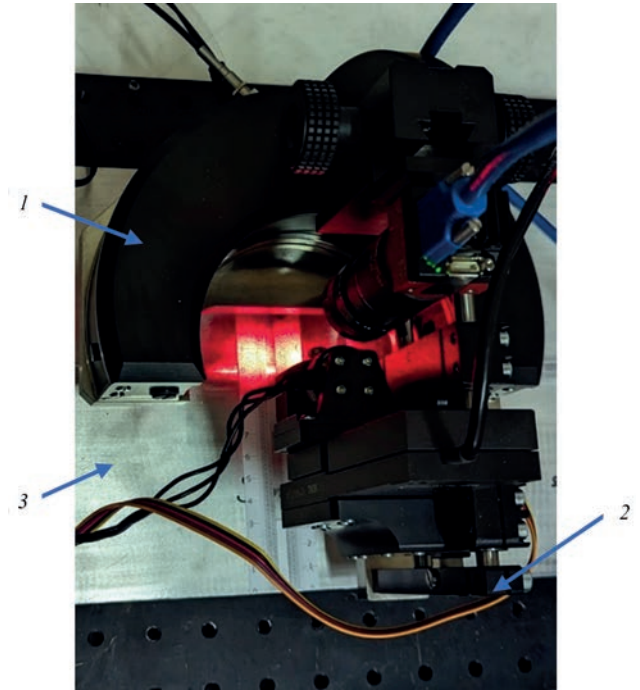


Рис. 2. Зовнішній вигляд ESPI-HD приладу для вимірювання залишкових напружень

щення в площині зразка навколо отвору, за якими визначалися залишкові напруження [10, 11]. Метод ESPI-HD продемонстрував задовільне збіг результатів вимірювань напруженого стану з іншими традиційними методами під час Round-Robin тесту Міжнародного інституту зварювання [12].

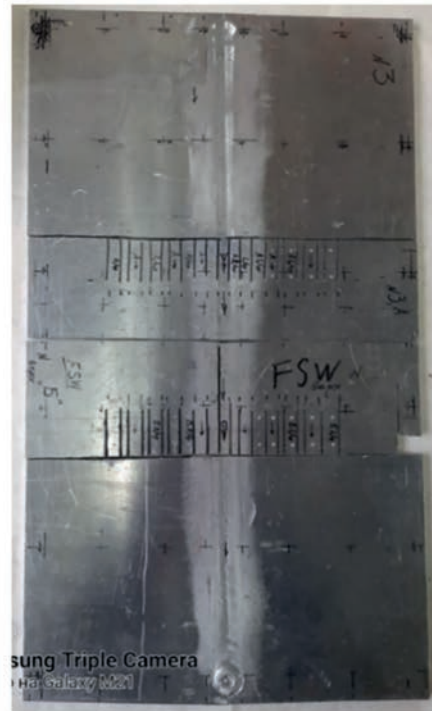
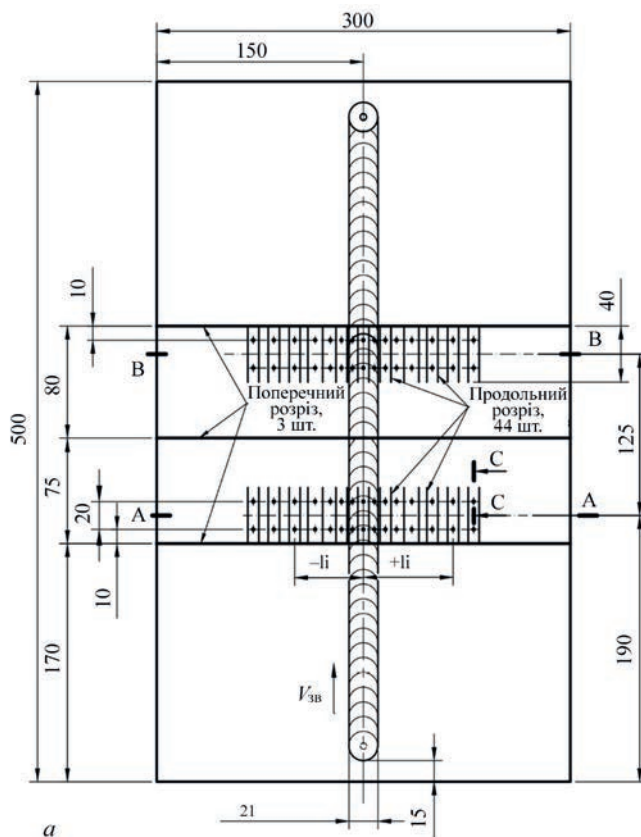


Рис. 3. Схема розташування вимірювальних баз (а) та зовнішній вигляд (б) зразка (зразок № 2) розміром 500×300×8 мм стикового з'єднання пластин за

Зразок для вимірювання залишкових напружень являє собою стикове з'єднання двох однакових пластин завдовжки 500 мм, завширшки 300 мм і завтовшки 8 мм. Для вимірювання залишкових пружних деформацій використано 26 вимірювальних баз (52 отвори) у поперечному перерізі на обох сторонах зразка (рис. 3).

Результати вимірювання залишкових поздовжніх напружень у зразку № 1 у центральному перерізі та у зразку № 2 у двох перерізах А і В (рис. 3) зразка стикового з'єднання, виконаного ЗТП, після повного розрізання матеріалу на поздовжні темп-

лети та вимірювання пружних деформацій показали гарну повторюваність результатів і максимальний рівень розтягувальних напружень до 180 МПа (рис. 4, 5). Визначено значна відмінність між рівнем залишкових поздовжніх напружень на верхній і нижній сторонах зразка. На верхній стороні рівень виміряних напружень помітно нижче: максимальні розтягувальні напруження не перевищують 80...100 МПа, у той час як на нижній стороні – досягають 180 МПа. Значну згинальну складову поздовжніх напружень по товщині підтверджує наявність залишкового поздовжнього прогину центральної частини зразка до 2,5 мм.

Вимірювання методом спекл-інтерферометрії (із застосуванням свердління отворів діаметром 1 мм) проводили на зразку № 1 у двох поперечних перерізах: переріз 1 – на відстані 130 мм від початку зварного шва та переріз 2 – на відстані 350 мм. У перерізі 1 вимірювання отримано на верхній і нижній сторонах зразка, а в перерізі 2 – тільки на нижній стороні, в зоні високих розтягувальних напружень. Результати вимірювання показали (рис. 6, а), що на верхній стороні розтягувальні поздовжні напруження не перевищують 120...150 МПа, а на нижній стороні досягають 200...210 МПа. Решта компонентів залишкових напружень істотно нижчі

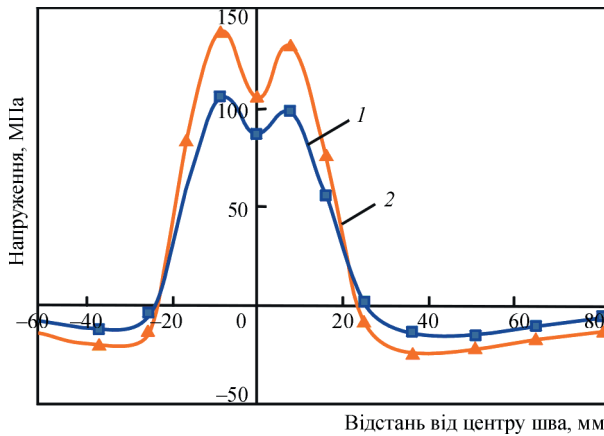


Рис. 4. Залишкові поздовжні напруження в поперечному центральному перерізі в зразку № 1 на верхній (σ_x , верх) (1) і нижній (σ_x , низ) (2) сторонах зразка

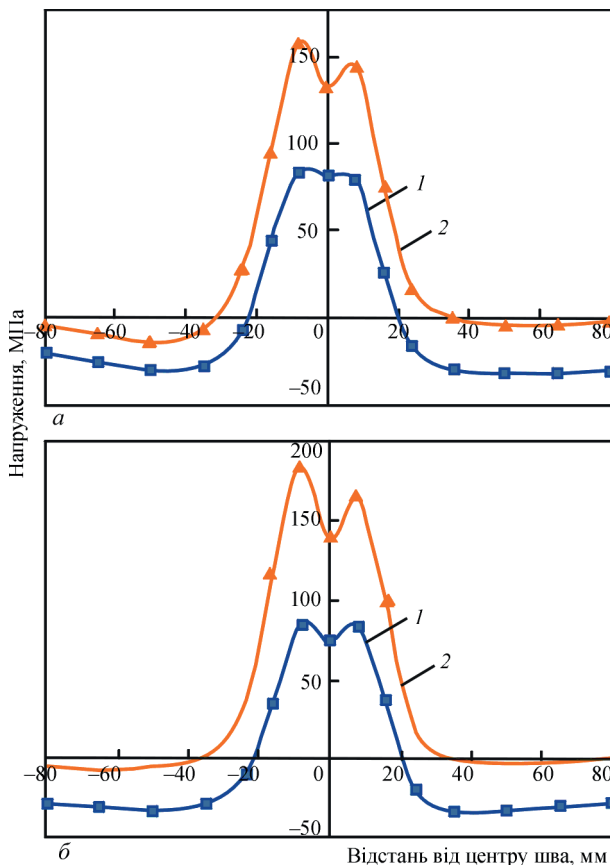


Рис. 5. Експериментальні розподіли залишкових поздовжніх напружень на і верхній (1) і нижній (2) сторонах зварного зразка № 2 в перерізах А-А (а) і В-В (б)

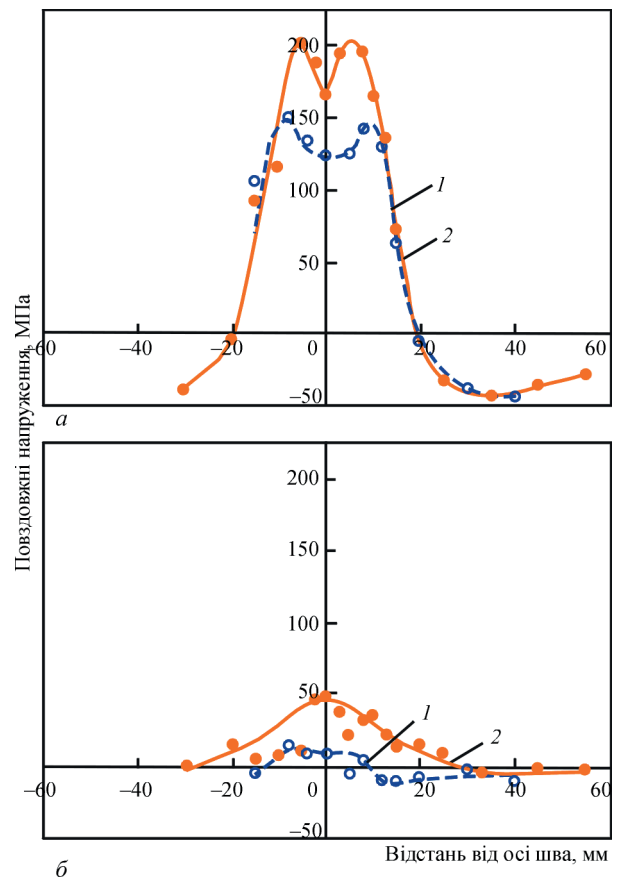


Рис. 6. Результати вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії у зразку № 1: а – поздовжня компонента; б – поперечна компонента; 1 – верхня сторона зразка; 2 – нижня сторона зварного зразка

за величиною: поперечні розтягувальні напруження на верхній стороні не перевищують 20...25 МПа, а на нижній 50 МПа (рис. 6, б).

Результати визначення напруженого стану в зразку № 1 двома методами показали, що при зварюванні тертям з перемішуванням значення максимальних залишкових поздовжніх напружень доволі високі та близькі до границі текучості алюмінієвого сплаву А2219 у відпаленому стані (до 150...180 МПа), тобто з урахуванням знеміцнення матеріалу в зоні зварювального нагріву. При цьому залишкові напруження на нижній стороні зразка істотно вищі, ніж виміряні на верхній стороні: поздовжні – на 20...30 %, поперечні – в 5 разів.

Вимірювання механічних характеристик матеріалу зварного з'єднання. Проведено дослідження механічних властивостей матеріалу зварних зразків. Для випробувань на одновісний розтяг було зроблено по 10 зразків на розрив з основного матеріалу (рис. 7, а) у двох взаємно перпендикулярних напрямках з метою визначення напрямку прокату. Метал із зварного з'єднання значно меншою мірою залежить від напрямку прокату через перекристалізацію металу шва та ЗТВ у процесі зварювання, тому для цих випробувань використовувалися 10 зразків (рис. 7, б).

Результати випробувань показали, що вплив напрямку прокату на механічні властивості матеріалу зварних зразків не перевищує 4,5 %. Це дозволяє не враховувати анізотропію матеріалу під час проведення відповідних експертних оцінок, оперуючи мінімальною середньою величиною ($\sigma_{0,2} = 370$ МПа, $E = 75,3$ ГПа). Крім того, відчутний вплив надає процес перекристалізації металу в області шва, де спостерігається суттєве розміцнення металу: зниження тимчасового опору розриву σ_B до 44,4 % і справжньої границі плинності $\sigma_{0,2}$ до 63,4 % порівняно зі зразком основного матеріалу вздовж прокату.

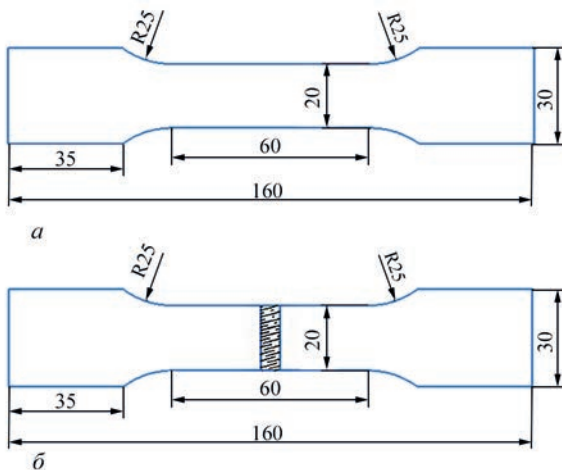


Рис. 7. Схеми зразків на розтяг основного металу (а) і металу шва зварного з'єднання (б)

За результатами вимірювання твердості за Роквелом у поперечному перерізі дослідного зразка (рис. 8) було визначено, що в зоні зварного з'єднання в ЗТВ спостерігається зона знеміцнення матеріалу завширшки ~20 мм, де характеристики твердості знижуються майже вдвічі, у середньому з 70 до 35 HRB. Це також узгоджується з визначеним у результаті механічних випробувань зразків на розтяг зниженням у ЗТВ характеристик міцності матеріалу для сплаву А2219-Т81, а саме границі текучості з 350 до 160 МПа.

Порівняння з результатами математичного моделювання ЗТП. Для математичного моделювання залишкових напружень при ЗТП алюмінієвого сплаву використовувалась розроблена раніше модель [5], яка була доповнена врахуванням ефекту знеміцнення матеріалу в зоні шва і ЗТВ.

Температурна модель:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t), \quad (1)$$

де T – температура °С; c – питома теплоємність, Дж/кг×°С; ρ – густина, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м×°С; $W(x, y, z, t)$ – потужність об'ємного тепловиділення, Вт/м³.

Особливістю розробленої моделі джерела нагріву при ЗТП є тепловиділення за рахунок тертя інструменту відносно матеріалу з'єднання. Інструмент обертається навколо вертикальної осі з певною кутовою швидкістю ω , об/с, і притискається до пластин з осьовим зусиллям P_n , Па, що викликає на поверхні контакту інструменту тепловий потік у матеріал з'єднання, Вт/м²:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot r, \quad (2)$$

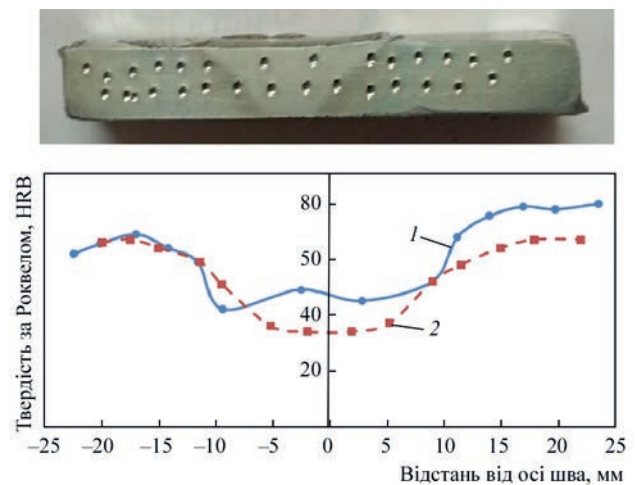


Рис. 8. Розподіл твердості за Роквелом у з'єднанні ЗТП пластин зі сплаву А2219-Т81: 1 – верхня сторона зразка; 2 – нижня сторона зразка

де μ – коефіцієнт тертя, $r = \sqrt{(x-x_0 - v_w t)^2 + (y-y_0)^2}$ – відстань розглянутої точки контакту від осі обертання робочого інструменту ($x_0 + v_w t, y_0$), v_w – лінійна швидкість руху інструменту.

Тоді потужність тепловиділення Q , Вт, на відповідних поверхнях контакту площею S (рис. 9):

$$Q = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot \pi \cdot \iint_S r dS, \quad (3)$$

плече ($z = \delta, R_1 < r < R_2$) $Q_1 = \frac{2\pi}{3} \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot (R_2^3 - R_1^3)$,

бічна поверхня штиря ($\delta-h < z < \delta, r = R_1$)

$$Q_2 = 2\pi \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^2 \cdot h,$$

нижня торцева поверхня штиря ($z = \delta-h, 0 > r > R_1$)

$$Q_3 = \frac{2\pi}{3} \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^3,$$

де δ – товщина зварюваних пластин, м; h – довжина штиря, який входить у матеріал, м.

Відповідно потужність об'ємного тепловиділення $W(x, y, z, t)$, Вт/м³ складається з двох складових. Перша пов'язана з тепловиділенням в об'ємі V_1 на верхній стороні пластин з'єднання під плечем інструменту ($\delta-dz < z < \delta, R_1 < r < R_2$), dz – розмір скінченного елемента, а друга – в об'ємі штиря V_2 ($\delta-h < z < \delta, 0 > r > R_1$):

$$W(x, y, z, t) = W_1 + W_2,$$

$$W_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{\frac{2\pi}{3} \mu P_n \omega (R_2^3 - R_1^3)}{\pi (R_2^2 - R_1^2) dz} = \frac{2\mu P_n \omega (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)}{3(R_2 + R_1) dz}, \quad (4)$$

$$W_2 = \frac{Q_2 + Q_3}{V_2} = \frac{2\pi \mu P_n \omega R_1^2 h + \frac{2\pi}{3} \mu P_n \omega R_1^3}{\pi R_1^2 h} = 2\mu P_n \omega \left(1 + \frac{R_1}{3h} \right).$$

Модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання при ЗТП ґрунтується на припущенні, що процес перемішування матеріалу зварного з'єднання відбувається в зоні зварного шва при досить високій температурі та помітно не впливає на загальний результат утворення та розвитку пластичних деформацій у матеріалі ЗТВ і зварного шва за робочим інструментом. Тобто пластичні деформації і залишкові напруження утворюються тільки внаслідок градієнту температур, який виникає при русі робочого інструменту як джерела об'ємного тепловиділення (4). Детальніше запропоновану математична модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання при ЗТП представлено в [5].

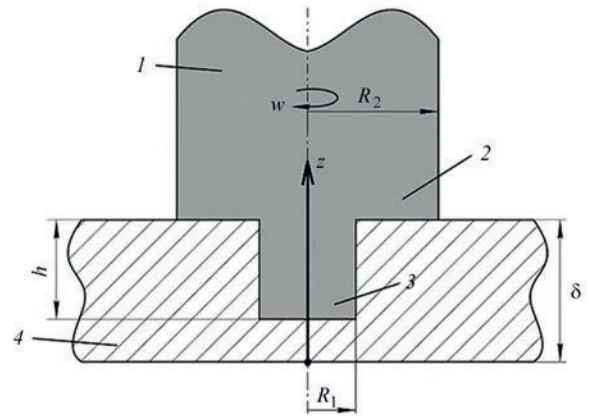


Рис. 9. Схема робочого інструменту при ЗТП: 1 – інструмент; 2 – плече; 3 – пластина; 4 – штир

З метою спрощення моделі було прийнято припущення, що значення коефіцієнту тертя не залежить від температури та дорівнює приблизно середньому значенню $\mu = 0,4$, отриманому для алюмінієвого сплаву 2219 у діапазоні температури матеріалу до 400 °С [8].

На рис. 10, 11 представлені механічні та теплофізичні властивості сплаву 2219-T81 у залежності від температури [6], які використовувались при математичному моделюванні:

Аналіз результатів чисельних експериментів показав, що серед факторів, які можуть у той чи

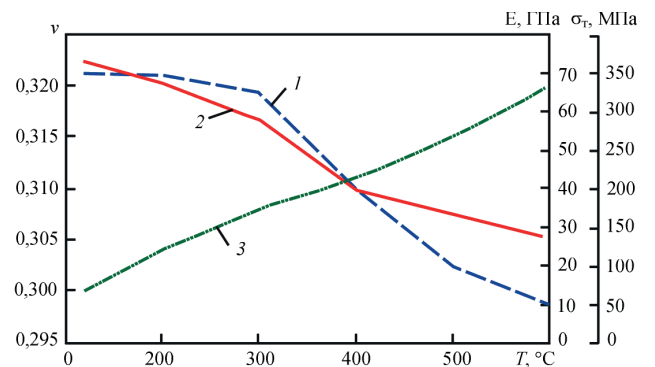


Рис. 10. Механічні властивості сплаву 2219-T81: 1 – $\sigma_1(T)$; 2 – $E(T)$; 3 – $\nu(T)$

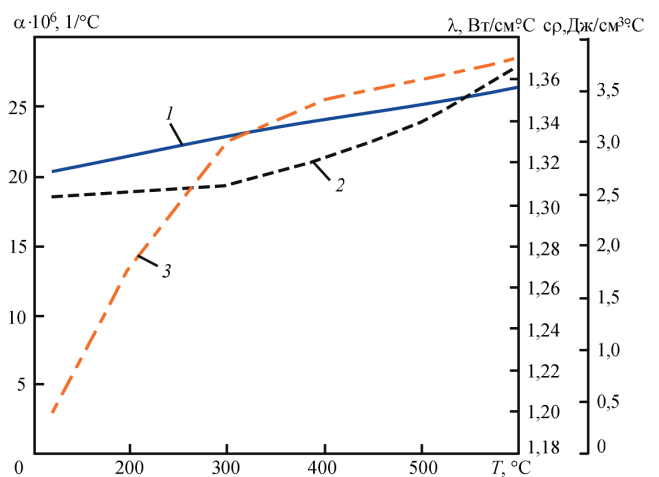


Рис. 11. Теплофізичні властивості сплаву 2219-T81: 1 – $\alpha(T)$; 2 – $ср(T)$; 3 – $\lambda(T)$

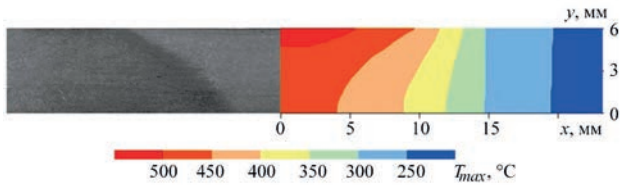


Рис. 12. Порівняння розрахункового розподілу максимальних температур у поперечному перерізі зварного з'єднання ЗТП з формою ЗТВ на макрощіфі

іншій мірі впливати на утворення залишкових напружень у зварному з'єднанні при ЗТП алюмінієвих сплавів, найбільший ефект має зменшення матеріалу від зварювального нагріву [7].

Порівняння розрахункового розподілу максимальних температур у поперечному перерізі зварного з'єднання ЗТП пластин $\delta = 6$ мм зі сплаву A2219-T81 (рис. 12) з результатами вимірювання твердості (рис. 8) показало, що ширина зони початку зменшення 40 мм відповідає температурі $T_s = 240$ °C, а зона максимального зменшення на верхній стороні завширшки ~ 20 мм і на нижній стороні завширшки 10 мм визначає температуру завершення зменшення на рівні $T_e = 450$ °C нагріву матеріалу при зварюванні.

Прийняті в моделі параметри зменшення матеріалу – це границя текучості зменшеного матеріалу $\sigma_{soft} = 160$ МПа, а також температури початку $T_s = 240$ °C і завершення $T_e = 450$ °C зменшення (рис. 13). При математичному моделюванні НДС при ЗТП неврахування зменшення матеріалу призводить до суттєвого збільшення (більш ніж на 30 %) максимальних поздовжніх залишкових напружень.

Порівнюючи результати розрахунку та експериментальні дані, отримані на зразку № 2, за розподілом залишкових поздовжніх напружень при ЗТП (рис. 14), можна стверджувати, що характер розподілу розрахункових залишкових напружень

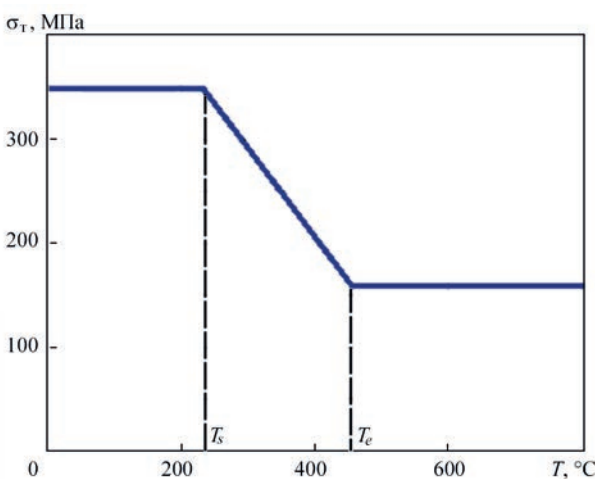


Рис.13. Залежність границі текучості матеріалу зразка зі сплаву A2219-T81 від максимальної температури нагріву при зварюванні: $T_s = 240$ °C, $T_e = 450$ °C, $\sigma_{soft} = 160$ МПа, $\sigma_T = 350$ МПа

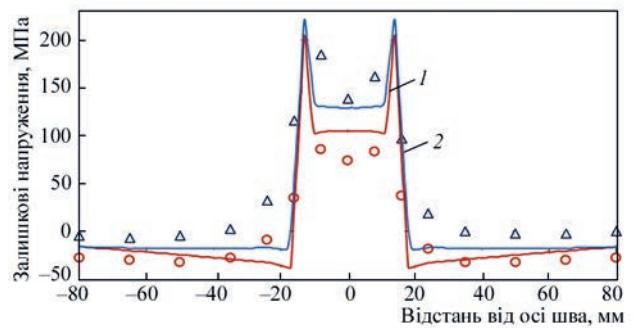


Рис. 14. Порівняння експериментальних даних з результатами математичного моделювання розподілу залишкових поздовжніх напружень для зразка ЗТП: експериментальні дані: \circ – верхня сторона зразка; Δ – нижня сторона зразка; розрахункові дані: 1 – верхня сторона зразка; 2 – нижня сторона зразка

близький до експериментального. У центрі зварного з'єднання є зона суттєвого зниження розтягувальних поздовжніх напружень, що пов'язано з ефектом зменшення алюмінієвого сплаву. Ширина зони розтягувальних напружень приблизно 36 мм ($-18...+18$ мм) і однакова як для експериментальних, так і для розрахункових даних.

Розрахунковий розподіл напружень характеризується різкими градієнтами та вищими значеннями напружень у зоні шва. Гладкіша крива експериментального розподілу залишкових напружень пов'язана з достатньо великим кроком (8 мм) між точками вимірювання, що призводить до усереднення значень напружень.

Важливо, що для експериментальних і розрахункових даних характерною є значна різниця між напруженнями на верхній і нижній сторонах зварного з'єднання – на нижній стороні залишкові поздовжні напруження вищі. За абсолютною величиною розтягувальних напружень у центрі зварного з'єднання ця різниця за експериментальними даними досягає 140 і 130 МПа згідно з розрахунком.

Оцінка похибки розрахункових даних для ЗТП показує, що в зоні розтягувальних напружень (3 центральні точки, $-16...+16$ мм) середньоквадратичне відхилення від експериментальних значень на нижній стороні зразка складає 21 %, а на верхній стороні – до 30 %. Така похибка може прийматися задовільною, враховуючи складний характер розподілу залишкових напружень.

Висновки

1. Для зразків зварних стикових з'єднань завтовшки 8 мм, виконаних із алюмінієвого сплаву A2219-T81 зварюванням тертям з перемішуванням, вимірний рівень розтягувальних залишкових поздовжніх напружень виявився досить високим (до 180 МПа), близьким до границі текучості алюмінієвого сплаву у відпаленому стані. При

цьому залишкові напруження на нижній стороні зразка вищі, ніж на верхній стороні (приблизно на 20 %). Поперечні розтягувальні залишкові напруження істотно нижчі за величиною: на верхній стороні не перевищують 20...25 МПа, а на нижній – 50 МПа.

2. На результат математичного моделювання залишкових напружень при ЗТП алюмінієвих сплавів суттєво впливає врахування моделі знеміцнення матеріалу в зоні зварювального нагріву, параметрами якої є значення границі текучості знеміцненого матеріалу σ_{soft} , а також діапазон температури початку T_s і завершення T_e ефекту знеміцнення. Неврахування знеміцнення матеріалу призводить до суттєвого збільшення (більш ніж на 30 %) максимальних повздовжніх залишкових напружень.

Список літератури/References

- Hattel, J.H., Sonne, M.R., Tutum, C.C. (2015) Modelling residual stresses in friction stir welding of Al alloys—a review of possibilities and future trends. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **76**, 1793–1805. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6394-2>
- Poklyatskyi, A.G., Motrunich, S.I., Fedorchuk, V.Ye. et al. (2023) Mechanical properties and structural features of butt joints produced at FSW of aluminium alloys of different alloying systems. *The Paton Welding J.*, **4**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.04.01>
- Feng, Z., Wang, X.-L., David, S.A., Sklad, P.S. (2007) Modelling of residual stresses and property distributions in friction stir welds of aluminium alloy 6061-T6. *Science and Technology of Welding and Joining*, **12**(4), 348–356. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329307X197610>
- Mohammad Riahi, Hamidreza Nazari (2011) Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **55**, 143–152. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3038-z>
- Tsaryk, B.R., Muzhychenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. *The Paton Welding J.*, **9**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.09.06>
- Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Yunxin Wu, Hai Gong, Lin Nie (2019) Finite element prediction of residual stress and deformation induced by double-pass TIG welding of Al 2219 plate. *Materials*, **12**(14), 2251. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12142251>
- Махненко О.В., Царик Б.Р. (2024) Врахування розміцнення матеріалу при розрахунковому визначенні залишкових напружень при зварюванні алюмінієвого сплаву 2219-T81. *Матеріали XIV міжн. наук.-практ. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, 23–24 травня 2024 р., м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка», Т. 2, сс. 110–111.
- Makhnenko, O.V., Tsaryk, B.R. (2024) Consideration of material softening in the calculated determination of residual stresses at welding of aluminum alloy 2219-T81. In: *Proc. of 14th Int. Sci.-Pract. Conf. on Comprehensive Quality Assurance of Technological Processes and Systems*, May 23–24, 2024, Chernihiv, Chernihiv Polytechnic National University, NU Chernigivska Politechnik, Vol. 2, 110–111.
- Aziz, S.B., Dewan, M.W., Huggett, D.J. et al. (2016) Impact of friction stir welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints. *Acta Metal. Sin. (Eng. Lett.)*, **29**, 869–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0466-2>
- Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М. (1981) *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*. Киев, Наукова думка.
- Kasatkin, B.S., Kudrin, A.B., Lobanov, L.M. (1981) *Experimental methods for studying deformations and stresses*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **8**, 35–40.
- Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2014) Technology and equipment for determination of residual stresses in welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Materials Science Forum*, **768-769**, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166>
- Wohlfahrt, H., Nitschkepagel, T., Dilger, K. et al. (2012) Residual stress calculations and measurements – review and assessment of the IIW round robin results. *Weld. World*, **56**, 120–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321387>

RESIDUAL STRESSES INDUCED BY FRICTION STIR WELDING OF THERMO STRENGTHENED ALUMINUM ALLOY 2219-T81 PLATE

O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, V.I. Pavlovsky, V.V. Savitsky, B.R. Tsaryk

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Friction stir welding (FSW) is a relatively new welding process that has already been widely used for joining structures in the aerospace industry, transport and shipbuilding. It is believed that, in comparison with traditional arc welding processes, FSW ensures less heating of the metal of the joint and a reduction in the level of residual stresses and strains. In the work the features of the distribution of residual stresses induced by FSW in the butt joint of thermo-strengthened aluminum alloy are investigated, which is necessary for predicting the strength and service life of welded structures. A mathematical model was built to determine the residual stresses at FSW, and the effect of softening of the aluminum alloy during heating in welding on the residual stresses was considered. Comparison of calculated and experimental data on the distribution of residual longitudinal stresses in FSW samples showed a satisfactory level of their correspondence. It is shown that the determined level of residual tensile stresses is close to the yield strength of the annealed metal. 12 Ref., 14 Fig.

Keywords: aluminum alloy, friction stir welding, butt joint, residual stresses, mathematical modeling, experimental measurement

Отримано 15.08.2024

Отримано у переглянутому вигляді 17.09.2024

Прийнято 30.09.2024