

ТЕРМОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ЛИСТІВ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ

М.А. Хохлов¹, О.О. Махненко², В.А. Костін¹, А.Г. Покляцький¹, Ю.В. Фальченко¹, Ю.А. Хохлова¹

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: khokhlova.julia@gmail.com

²Київський Академічний Університет. 03142, м. Київ, вул. Академіка Вернадського 36

Експериментальне лабораторне обладнання для зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) в результаті відпрацювання оптимальних режимів зварювання при різних лінійних швидкостях дозволяє отримувати якісні стикові з'єднання з тонких пластичних металів. З розробкою нових математичних інструментів моделювання термодформаційних процесів з'явилась можливість аналізувати напружено-деформований стан та термомеханічні процеси, що відбуваються у зоні з'єднання ЗТП, а це є необхідним для прогнозування експлуатаційних властивостей, міцності і ресурсу зварних конструкцій з тонкого металу. Використовуючи математичні моделі і скінчено-елементний аналіз було візуалізовано температурні розподіли від об'ємного джерела нагріву при ЗТП та чисельним шляхом визначено залишкові деформації і напруження в зоні стикових зварних з'єднань тонких листів магнієвих сплавів. Надалі доцільним є визначити ефективний баланс лінійної швидкості та швидкості обертання інструменту ЗТП для отримання більшої однорідності структури шва та зниження тепловнесення в метал при зварюванні. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: магнієві сплави, зварювання тертям з перемішуванням, мікроструктура, модуль пружності, температурні розподіли, залишкові напруження, пластичні деформації

Вступ. Магній має високу питому міцність, високі характеристики жорсткості та демпфування, абсолютну біологічну сумісність, тому входить у десятку рейтингу інноваційних матеріалів майбутнього для використання в конструкційних елементах аерокосмічної техніки, автомобілів, спортивного обладнання, мікроелектроніки, в хірургічній імплантації [1–3]. Співвідношення міцності до ваги деталей із магнієвих сплавів робить їх одним із багатьох важливих матеріалів, що замінять алюміній та використовуватимуться в найближчі роки в автомобілебудуванні для зниження сили інерції та на користь продуктивності, керованості та економії палива. Значна частина наукових досліджень щодо зварювання магнієвих сплавів розглядає досвід використання екологічної та енергетично незатратної технології – зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП), яка використовується для з'єднання у твердій фазі деталей з відносно простою геометрією. Статистично вдалим є досвід [4] використання при ЗТП інструменту у вигляді гладкого штифта із увігнутих плечем, бо це дозволяє уникнути деформації при з'єднанні легких та пластичних сплавів, зварні шви формуються без порожнеч та містять локально зміцнені зони вдовж нижнього контуру ядра шва [5, 6]. Ідеєю наступних експериментів стало математичне моделювання температурних та деформаційних процесів при ЗТП з використанням фундаментальних закономір-

ностей [7–12]. Такий комплексний підхід в оцінці якості формування зварного з'єднання розробляється для подальшого використання у статистичних масштабованих моделях щодо прогнозування експлуатаційних властивостей, міцності і ресурсу зварних конструкцій з тонких магнієвих сплавів.

Метою цього дослідження є отримання якісних стикових з'єднань ЗТП з магнієвого сплаву при постійній частоті обертання інструменту і при різних лінійних швидкостях зварювання, визначення методом індентування фізико-механічних параметрів матеріалу в зоні ЗТП, а також експериментальне вимірювання поверхневих температурних полів при ЗТП, визначення методами математичного моделювання температурних полів, розподілів деформацій та залишкових напружень в стикових з'єднаннях ЗТП.

Матеріали та методи дослідження. Зварювання стикових з'єднань тонких листів магнієвого сплаву МА2-1 системи Mg–Al–Zn (табл. 1) товщиною 2 мм провели на лабораторному експериментальному зварювальному обладнанні для ЗТП при постійній частоті обертання інструменту 1420 об/хв та при різних лінійних швидкостях (8, 16, 24 м/год).

Порівняльну оцінку температурних полів (°C) при ЗТП робили експериментально інфрачервоним тепловізором Fluke Ti25 (рис. 1) та у COMSOL Multiphysics проводили моделювання кінетики зміни температурних полів в процесі ЗТП.

Хохлов М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-8180-3459>, Махненко О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2319-2976>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Хохлова Ю.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2145-973X>
© М.А. Хохлов, О.О. Махненко, В.А. Костін, А.Г. Покляцький, Ю.В. Фальченко, Ю.А. Хохлова, 2024

Таблиця 1. Хімічний склад магнієвого сплаву МА2-1, ваг. %

Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Інші
0,04	0,1	0,3...0,7	0,004	3,8...5,0	0,05	0,002	92,6...95,1	0,8...1,5	0,3

Для визначення особливостей макро- та мікроструктури методом оптичної мікроскопії та фізико-механічних властивостей методом інденування були виготовлені шліфи зварних з'єднань та оброблені водним розчином суміші 5 %-ної соляної кислоти та 5 %-ної ортофосфорної кислоти. Експериментальне визначення модуля Юнга інденуванням проводилось для уточнення даних, що використовувались для моделювання зварювання. Інденування при навантаженні 100 г з автоматичним визначенням модуля пружності (E) проводили тригранним індентором Берковича на комп'ютеризованому приладі «Мікрон-Гама» згідно ISO/FDIS 14577-1:2015; Metallic materials – Indentation test for hardness and materials parameters [13–15] (вимірювання значення твердості, що дозволяє визначити тест, в даній роботі не використовується). Дослідження макроструктури провели оптичним бінокляром (збільшення 40...100), дослідження мікроструктури та навігацію при інденуванні здійснювали мікроскопом приладу та цифровою відеокамерою для мікроскопів DCM500. Дослідження рівня дисперсності мікроструктури виконували методом скануючої електронної мікроскопії (СЕМ)

на JSM-840 (JEOL, Японія) у режимі вторинних електронів (SEI) з прискоренням напруження 20 кВ та струмі зонду 10^{-7} А. Електронний мікроскоп оснащений комбінованою системою енерго-дисперсійного мікроаналізу INCA PentaFet («INCA», Англія) та системою реєстрації цифрового зображення Scan Micro Capture 2.1.

В методології [9] чисельного аналізу термодформаційних процесів при ЗТП для визначення кінетики температурних розподілів використовується рівняння нестационарної теплопровідності,

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

що враховує потужність об'ємного виділення тепла $W(x, y, z, t)$, ρ – густини матеріалу; c – питомої теплоємності; λ – коефіцієнту теплопровідності; T – температури матеріалу (табл. 2).

Граничні умови на поверхнях з'єднання з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем:

$$q = -h(T_{\text{out}} - T), \quad (2)$$

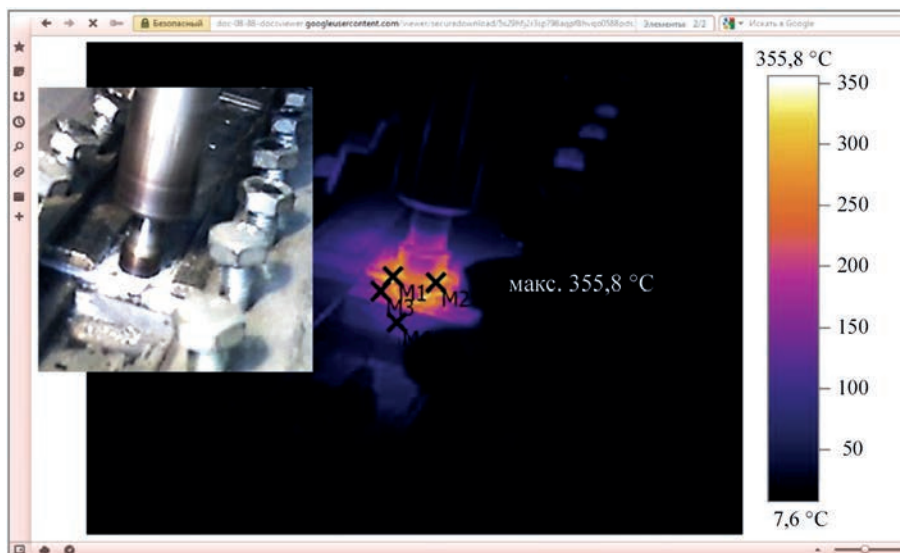


Рис. 1. Термограма температурного поля при ЗТП стикового з'єднання магнієвого сплаву товщиною 2 мм (Fluke Ti25)

Таблиця 2. Теплофізичні та механічні властивості магнієвого сплаву МА2-1 ($T_{\text{пл}} = 650$ °C)

T , °C	Щільність, кг/м ³	Модуль пружності Юнга, ГПа	Межа текучості, МПа	Коефіцієнт теплопровідності (λ), W/m×°C	Питома теплоємність (c), J/(cm×°C)
20	1785	42	140	1,02	1,80
100	1785	40	137	1,07	1,86
200	1761	37	134	1,12	1,92
300	1746	35	129	1,18	1,98
400	1730	32	88	1,23	2,04
500	1714	29	63	1,25	2,13

де T_{out} – температура довколишнього середовища; q – тепловий потік; h – коефіцієнт теплопередачі з поверхні ($h = 10 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Потужність виділення тепла при ЗТП

$$W(x, y, z, t) = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot r, \quad (3)$$

при $z = 0$, $R1 < r < R2$ (на верхній поверхні в зоні плеча інструменту),

при $0 < z < \delta$, $r = R1$ (по товщині в зоні штиря інструменту), де μ – коефіцієнт тертя; P_n – нормальне зусилля в точці контакту; ω – кутова швидкість обертання інструменту; $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ – відстань точки контакту від осі обертання робочого інструменту (x_0, y_0); $R1$ – радіус штиря; $R2$ – радіус плеча; δ – товщина пластин, що зварюються.

В пружньопластичній постановці тензор деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (i, j = x, y, z), \quad (4)$$

де ε_{ij}^e – тензор пружних деформацій; ε_{ij}^p – тензор пластичних деформацій. Компоненти тензорів напружень σ_{ij} та пружних деформацій ε_{ij}^e пов'язані один з одним законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K \sigma + \varphi), \quad (5)$$

де δ_{ij} – одиничний тензор; $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$,

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль зсуву; $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – податливість об'ємного стиснення; E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона; φ – функція вільних відносних подовжень (об'ємних змін), викликаних зміною температури:

$$\varphi = \alpha(T - T_0), \quad (6)$$

де α – коефіцієнт відносного температурного подовження матеріалу.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії, асоційованої з умовою текучості Мізеса. Для розв'язку задачі з фізичною нелінійністю, пов'язаною з розвитком пластичних деформацій, використовують ітераційні процеси.

Розроблена математична модель дозволяє визначати залишкові зварювальні напруження та деформації в зоні стикового зварного з'єднання ЗТП в результаті нерівномірного температурного нагріву внаслідок механічного тертя інструменту відносно матеріалу пластин в процесі зварювання. Математична модель може бути ефективною для прогнозування загальних деформацій великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань. З метою спрощення моделі не

враховувалися: залежність коефіцієнта тертя від температури матеріалу, нагрівання та відведення тепла до робочого інструменту та устаткування закріплення.

Математичне моделювання процесу ЗТП проведено на пластинах із магнієвого сплаву товщиною 2 мм при постійній частоті обертання інструменту 1420 об/хв і для різних лінійних швидкостей зварювання 8, 16, 24 м/год з використанням спеціалізованої програми скінчено-елементного аналізу власної розробки.

Результати. При оптичному дослідженні макроструктури вибірки з 6 зразків, отриманих при різних лінійних швидкостях зварювання (рис. 2) визначили, що всі вони мають подібну та типову для ЗТП несиметричну форму шва з зонами знаходу металу (AS) і відходу (RS), та якісну безпорожнинну зону інтенсивної пластичної деформації. Ширина швів приблизно 10 мм.

Термодинамічні процеси при ЗТП формують чітку границю між ядром шва та ЗТМВ на стороні відходу (RS) (рис. 3, а). Базовий магнієвий сплав системи Mg–Al має катану структуру з витягнутим зерном (рис. 3, б). Структура ЗТМВ вздовж сторони знаходу (AS) має горизонтальні полоси дифузії потоків металу від початкового обертання ЗТП інструменту з мікроструктурою, подібною до основного металу (рис. 3, в). Підвищення пластичності металу шва від нагрівання при деформації скручування призводить до витягування та стискання границь зерна металу, а далі до локальної екструзії і рекристалізації. При цьому формуються дрібні округлі зерна розміром 1...10 мкм (рис. 3, г та рис. 4).

З фундаментальної точки зору, у хімічній системі Mg–Al, що зазнала інтенсивної деформації, в діапазоні 550...640 °C можливе утворення фаз розподілення, які складаються з Mg-rich та Al-rich

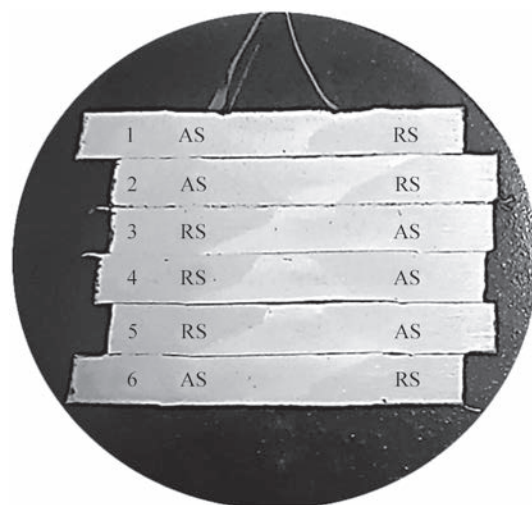


Рис. 2. Макроструктура стикових ЗТП з'єднань

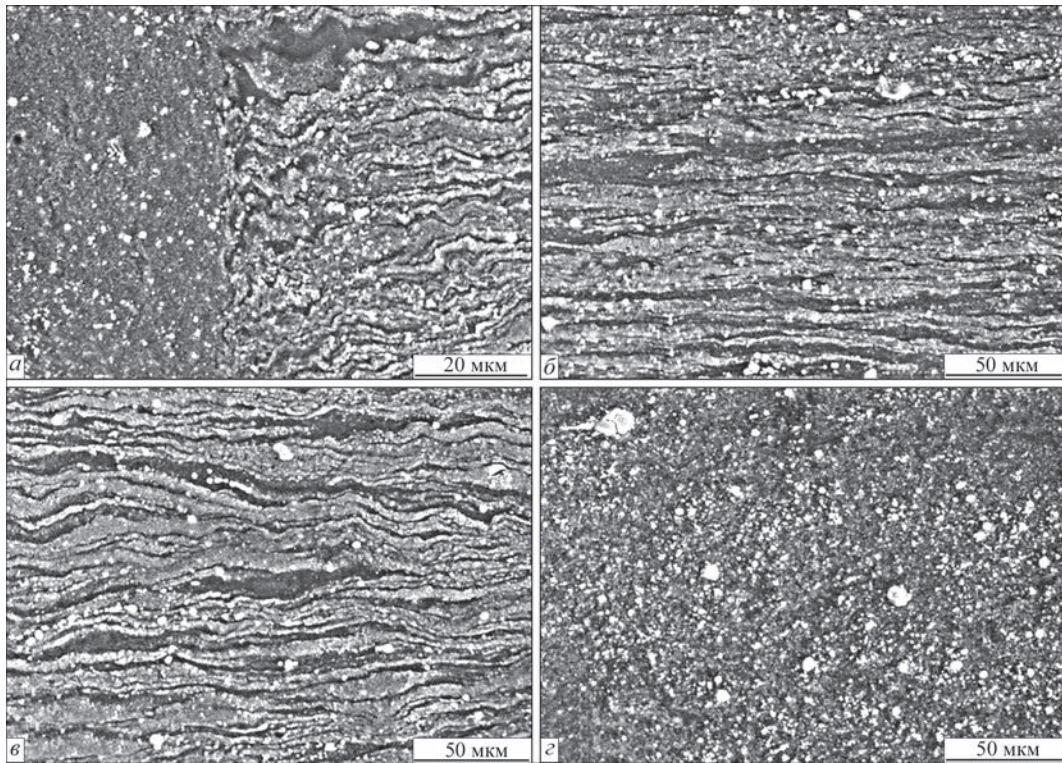


Рис. 3. Мікроструктура ЗТП шва на стороні відходу (RS) – основний метал (а), ЗТВ (б), ЗТВ-ЗТМВ-ядро шва (в) та середина ядра шва (г) (PEM)

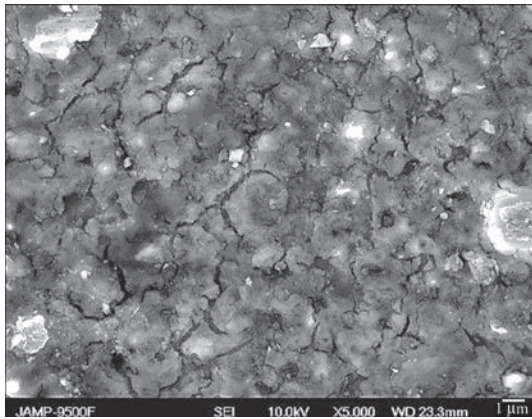


Рис. 4. Зона ядра містить високодисперсні зерна (CEM)

областей. Така температура забезпечує високу мобільність атомів, сприяє росту зерен розмірами від 50 до 500 нм за рахунок дифузії та рекристалізації. Ця рекристалізація при змішуванні зон з високою та низькою температурою відбувається з підвищенням щільності дислокацій на межах зерна та субзерна. Формуються, так звані бар'єри Ломера–Коттрелла, які зупиняють ковзання дислокацій через утворення на них порогів внаслідок взаємного перетину, далі вони пригнічують генерування нових дислокацій. Таким чином, чим важче переміщатися дислокаціям у матеріалі, тим більше деформаційне зміцнення. Зазвичай, формування високодисперсної якісної структури при ЗТП відбувається за участі кількох механізмів одночасно, і результат залежить від умов зварювання, хімічного складу матеріалу та інших факторів.

Визначення модулю пружності (E) провели для 5 типів текстур зони з'єднання – основний метал, ЗТМВ, верх, низ та центр ядра (рис. 5). У центральній частині ядра $E = 30$ ГПа, зона містить еліпсоїдну структуру (рис. 6) та витягнуті від притискання і обертання інструменту текстури у верхній та нижній частинах шва. Для верхньої частини шва $E = 36$ ГПа. У ядрі на відстані 50...150 мкм вздовж нижньої кромки зразка визначено найвище значення $E = 90$ ГПа. Тобто, підвищення пружності у 2...3 рази у порівнянні з основним металом, де $E = 35$ ГПа. Для зони ЗТМВ модуль пружності $E = 30$ ГПа.

Порівняння форми та глибини діаграм індентування показує більш пластичний стан основного металу (рис. 7, а), а у зоні ядра нижче середини перетину підвищена пружна реакція поверхні матеріалу (рис. 7, б). Глибина занурення індентора в основний матеріал більша та складає 7,57 мкм, а у зоні ядра нижче середини перетину складає 5,44 мкм. Оскільки така значна неоднорідність текстури зон ЗТП з'єднань створює в тонкому металі високий рівень пружно-деформованого стану, це забезпечує традиційну статистику руйнування по ЗТМВ при випробуваннях міцності на розрив, тому, зазвичай, рекомендована додаткова термообробка, після чого стан може нормалізуватися приблизно на 10 % [16].

По експериментальній термограмі процесу зварювання зафіксованого тепловізором (рис. 1)

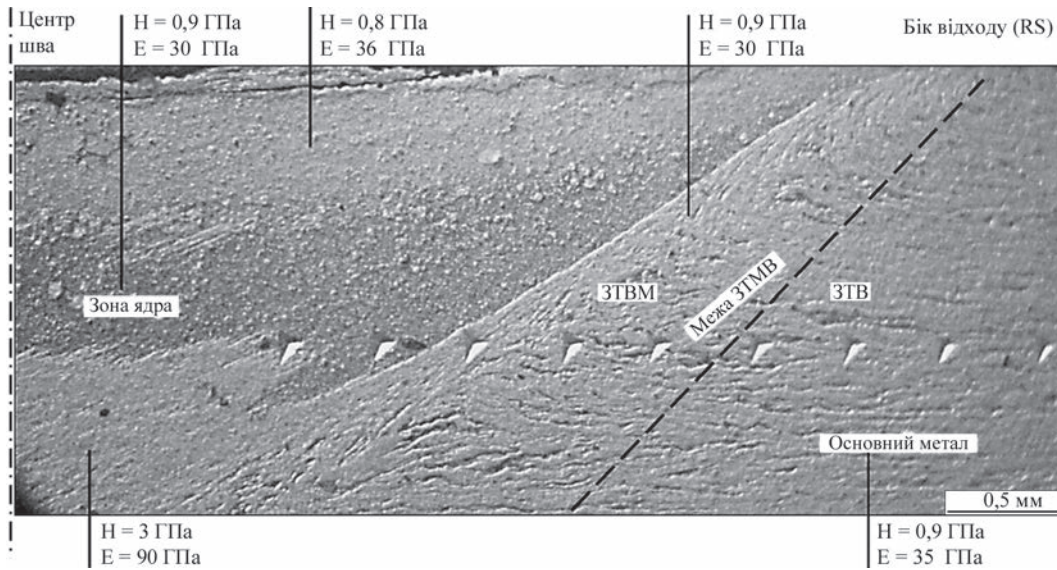


Рис. 5. Розподіл твердості та модулю пружності Юнга у ЗТП з'єднанні з боку RS

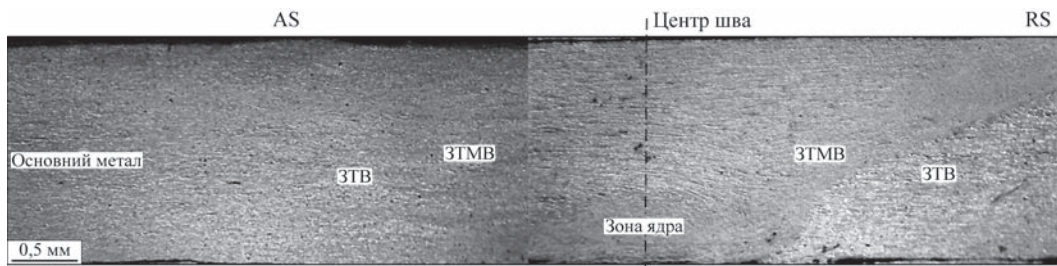


Рис. 6. Мікроструктура центральної частини ЗТП шва з відбитками індентора

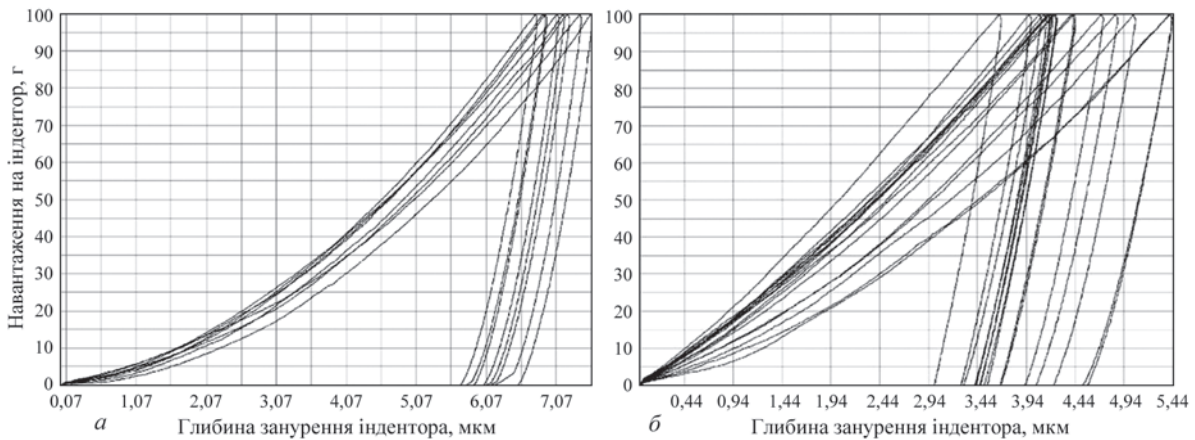


Рис. 7. Діаграми індентування основного металу (а) та ядра шва (б)

було приблизно визначено, що зовнішня поверхня магнієвого сплаву та інструмента при ЗТП має температуру не вище 355,8 °С. В моделі температурних полів при заданих параметрах зварювання (рис. 8) показано подібну температуру на незначній відстані від місця контакту циліндричного ЗТП інструменту з металом, а після проходження ЗТП інструменту температура на рівні 410 °С. У зоні, де формується подрібнена структура з підвищенням пружності у 2...3 рази температура 500 °С.

Згідно термічного циклу (рис. 9, а) нагрів до температури 600...610 °С при якій відбувається

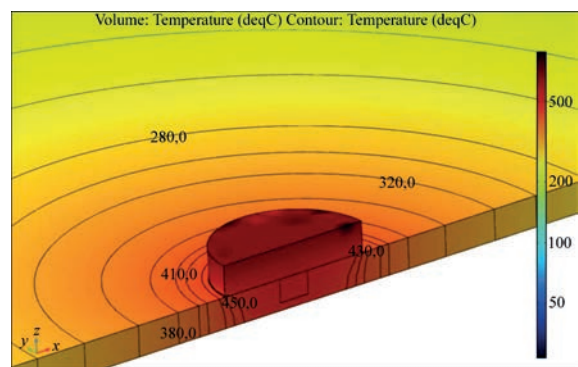


Рис. 8. Модель температурних полів процесу ЗТП

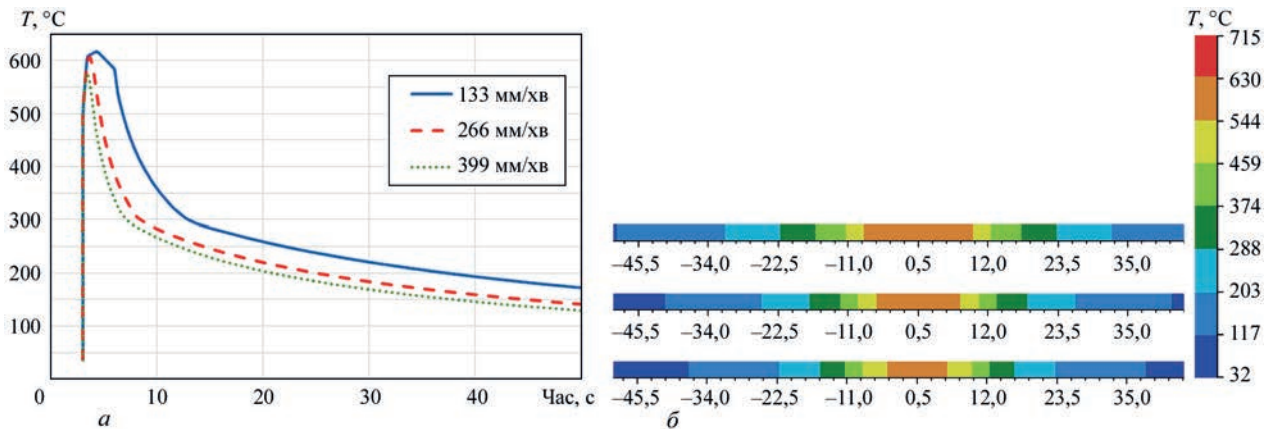


Рис. 9. Розподіл термічних циклів (а) та температурних полів (б) при ЗТП пластин товщиною 2 мм із магнієвого сплаву при різних лінійних швидкостях зварювання

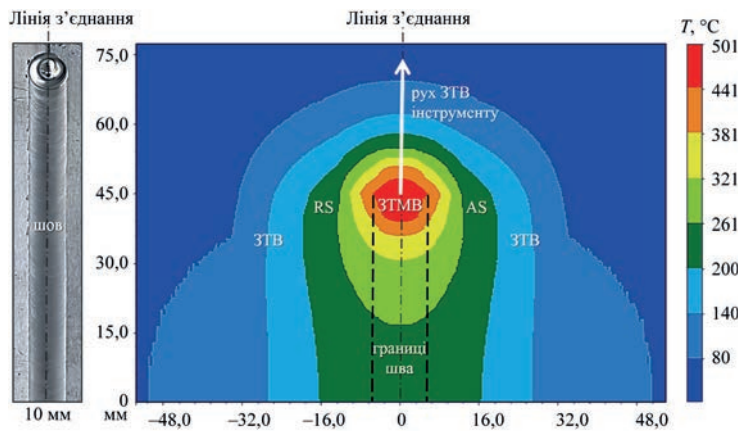


Рис. 10. Ширина ЗТМВ при лінійній швидкості 8 м/год в зразку та моделі

формування зварного з'єднання не має суттєвої залежності від лінійної швидкості просування ЗТП інструмента. Ширина температурного поля зони ЗТП з'єднання (рис. 9, б) зменшується з підвищенням лінійної швидкості та складає 8, 6 та 4 мм, для відповідно, лінійних швидкостей 8, 16 та 24 м/год.

Ширина зварного шва експериментально отриманих зразків з'єднань ЗТП при лінійній швидкості зварювання 8 м/год приблизно 10 мм (рис. 10) представлена у розрахункових даних подібною.

Розрахунки максимальних залишкових напружень розтягу показали, що вони досягають межі текучості матеріалу 140 МПа (рис. 11, а). Рівень максимальних розрахункових залишкових пластичних деформацій усадки відносно низький до $-0,35\%$ (рис. 11, б). При підвищенні лінійної швидкості зварювання, максимальні залишкові напруження розтягнення збільшуються на 10...15%, що пов'язано зі збільшенням градієнта температур під час зварювання. Також було встановлено, що залишкові пластичні деформації (повздовжні) ма-

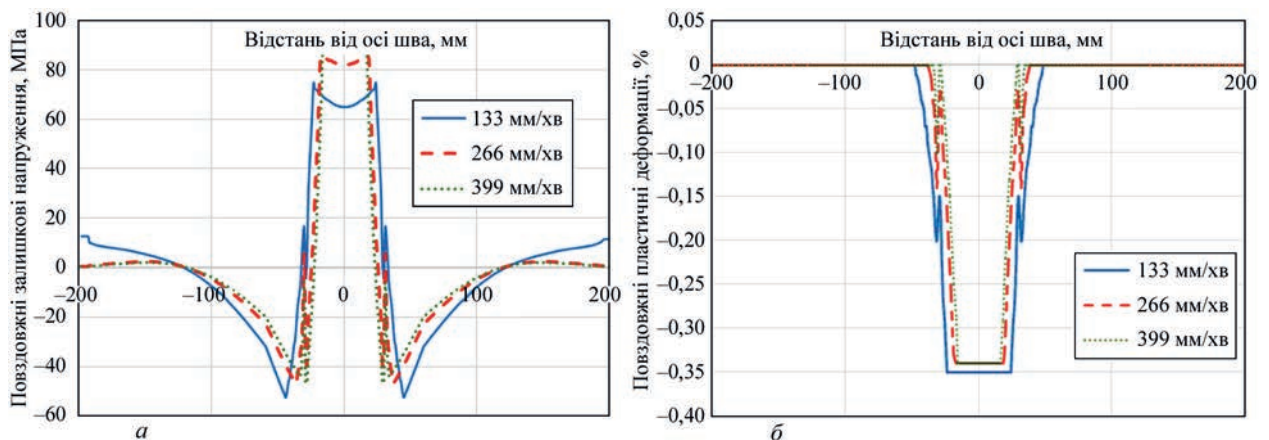


Рис. 11. Розподіл повздовжніх залишкових напружень (а) та пластичних деформацій (б) в стиковому з'єднанні пластин товщиною 2 мм із магнієвого сплаву при різних лінійних швидкостях ЗТП

ють незначне зменшення рівня зі збільшенням лінійної швидкості зварювання.

Висновки

Якісні зварні з'єднання тонких листів магнієвого сплаву отримуються при постійній частоті обертання ЗТП інструменту 1420 об/хв та лінійних швидкостях зварювання 8, 16, 24 м/год. Формується чітка текстурована границя між ядром шва та ЗТМВ на стороні відходу металу, ядро шва містить подрібнену еліпсоїдну структуру з підвищенням модуля пружності у 2...3 рази у порівнянні з основним металом. Визначене розрахунками температурне поле, що характеризує процес ЗТП, корелює з експериментально визначеною поверхневою температурою та має максимальну температуру на рівні 600 °С в зоні ядра, тобто метал в зоні з'єднання в пластичному стані. Моделювання кінетики зміни температурних полів в процесі ЗТП показало, що ширина ЗТВ зменшується з підвищенням лінійної швидкості. Встановлено, що при збільшенні лінійної швидкості зварювання максимальні залишкові напруження збільшуються на 10...15 %. Залишкові пластичні деформації зменшуються при підвищенні лінійної швидкості зварювання. Для отримання однорідності структури ЗТП шва тонких листів магнієвого сплаву може бути ефективним зниження тепловнесення в метал за рахунок підвищення лінійної швидкості ЗТП, чи зниження швидкості обертання ЗТП інструменту, тобто, надалі доцільним є визначити баланс лінійної швидкості та швидкості обертання ЗТП інструменту.

Список літератури

1. Yan Yanga, Xiaoming Xiong, Jing Chen et al. (2023) Review. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022. *Journal of Magnesium and Alloys*, **11**, 26112654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.011>
2. Jiangfeng Song, Jing Chen, Xiaoming Xiong et al. (2022) Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021. *Journal of Magnesium and Alloys*, **10**, 4, 863–898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.04.001>
3. Костін В.А., Фальченко Ю.В., Пузрін А.Л., Махненко А.О. (2023) Отримання, властивості та перспективи використання сучасних магнієвих сплавів. *Сучасна електроталургія*, **1**, 43–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem.2023.01.06>
4. Покляцький А.Г., Мотруніч С.І., Федорчук В.С., Ключков І.М. (2023) Міцність та структура стикових, напускних і кутових з'єднань сплаву АМg6М, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням, *Автоматичне зварювання*, **2**, 10–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.02.02>
5. Krzysztof Krasnowski et al. (2021) Relation between geometry of FSW tools and formation of nano- dispersed zones in macrostructure EN AW 6082-T6 alloy welded joints. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, **65**, **5**, 7–16. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2021.5/1>
6. Красновский К., Хохлова Ю.А., Хохлов М.А. (2019) Влияние формы инструмента для сварки трением с перемешиванием на физико-механические свойства сварных соединений алюминийевого сплава EN AW 6082-

T6. *Автоматическая сварка*, **7**, 9–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.02>

7. Царик Б.Р., Мужиченко О.Ф., Махненко О.В. (2022) Математична модель визначення залишкових напружень і деформацій при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Автоматичне зварювання*, **9**, 37–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.09.07>
8. Asadi et al. (2015) Microstructural simulation of friction stir welding using a cellular automaton method: a microstructure prediction of AZ91 magnesium alloy. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0048-5>
9. Махненко О.В., Кандава С.М., Басистюк Н.Р. (2021) Вплив коефіцієнта тепловіддачі на рівень залишкових напружень після термообробки вигородки реактора ВВЕР-1000. *Mech. Adv. Technol.*, **5**, 2, 254–259. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>
10. Makarenko, A.A., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical modeling of residual stresses in composite welded joints of WVER-1000 reactor vessel cover with CSS nozzles. *The Paton Welding J.*, **1**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.01.07>
11. Tsaryk, B.R., Muzhichenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. *Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)*, **9**, 37–44. <https://doi.org/10.37434/as2022.09.07>
12. Дутка В.А., Майстренко А.Л., Заболотний С.Д., Степанець А.М. (2023) Прогнозування теплового стану інструменту з надтвердих матеріалів при зварюванні тертям з перемішуванням жаростійких сплавів. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. пр. Вип. 26. Київ, ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, сс. 295–305. DOI: <https://doi.org/10.33839/2708-731X-24-1-295-305>
13. Хохлова Ю.А., Ищенко Д.А., Хохлов М.А. (2017) Идентификация от макро- до нанометрового уровня и примеры исследования свойств материалов с особой структурой. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 30–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.05>
14. Oliver, W.C., Pharr, G.M. (1992) An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, **7**, 1564–1583. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
15. Kazuhisa Miyoshi (2002) NASA/TM-2002-211497 *Surface Characterization Techniques: An Overview*. 12–22. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020070606.pdf>
16. Kulwant Singh, Gurbhinder Singh, Harmeet Singh (2019) *Microstructure and mechanical behaviour of friction-stir-welded magnesium alloys: As-Welded and post weld heat treated.*, 20, September 100600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100600>

References

1. Yan Yanga, Xiaoming Xiong, Jing Chen et al. (2023) Review. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022. *J. of Magnesium and Alloys*, **11**, 26112654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.011>
2. Jiangfeng Song, Jing Chen, Xiaoming Xiong et al. (2022) Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021. *J. of Magnesium and Alloys*, **10**(4), 863–898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.04.001>
3. Kostin, V.A., Falchenko, Yu.V., Puzrin, A.L., Makhnenko, A.O. (2023) Production, properties and prospects of application of modern magnesium alloys. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 43–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem.2023.01.06>
4. Poklyatskyi, S.I., Motrunich, S.I., Fedorchuk, V.E., Klochkov, I.M. (2023) Strength and structure of butt, overlap and fillet joints of AMg6M alloy produced by friction stir welding. *The Paton Welding J.*, **2**, 10–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.02.02>
5. Krasnowski, K. et al. (2021) Relation between geometry of FSW tools and formation of nano-dispersed zones in macrostructure EN AW 6082-T6 alloy welded joints. *Biuletyn In-*

- stytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 65(5), 7–16. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2021.5/1>
6. Krasnovsky, K., Khokhlova, Yu.A., Khokhlov, M.A. (2019) Influence of tool shape for friction stir welding on physico-mechanical properties of zones of welds of aluminium alloy EN AW 6082-T6. *The Paton Welding J.*, 7, 7-11. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.02>.
 7. 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/as2022.09.07>
 8. Asadi et al. (2015) Microstructural simulation of friction stir welding using a cellular automaton method: A microstructure prediction of AZ91 magnesium alloy. *Inter. J. of Mechanical and Materials Eng.* DOI: <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0048-5>
 9. Makhnenko, O.V., Kandala, S.M., Basystyuk, N.R. (2021) Influence of heat transfer factor on level of residual stresses after heat treatment of reflection shield of WWER-1000 reactor. *Mech. Adv. Technol.*, 5(2), 254–259. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>
 10. Makarenko, A.A., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical modeling of residual stresses in composite welded joints of WWER-1000 reactor vessel cover with CSS nozzles. *The Paton Welding J.*, 1, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.01.07>
 11. Tsaryk, B.R., Muzhichenko, O.F., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. *Avtomatischekaya Svarka (Automatic Welding)*, 9, 37–44. <https://doi.org/10.37434/as2022.09.07>
 12. Dutka, V.A., Maistrenko, A.L., Zabolotnyi, S.D., Stepanets, A.M. (2023) Prediction of thermal state of tool from super-hard materials in friction stir welding of heat-resistant alloys. *Instrumentalne Materialoznavstvo: Transact.*, Issue 26, Kyiv, ISM, 295–305 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.33839/2708-731X-24-1-295-305>
 13. Khokhlova, Yu.A., Ishchenko, D.A., Khokhlov, M.A. (2017) Indentation from macro- to nanometer level and examples of investigation of properties of materials with a special structure. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 1, 30–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.05>
 14. Oliver, W.C., Pharr, G.M. (1992) An improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, 7, 1564–1583. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
 15. Kazuhisa Miyoshi (2002) NASA/TM-2002-211497: *Surface characterization techniques: An overview*. 12–22. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020070606.pdf>
 16. Kulwant Singh, Gurbhinder Singh, Harmet Singh (2019) Microstructure and mechanical behaviour of friction-stir-welded magnesium alloys: As-welded and post weld heat treated, 20, September 100600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mt-comm.2019.100600>.

THERMO-MECHANICAL PROCESSES IN FRICTION STIR WELDING OF MAGNESIUM ALLOY SHEETS

Khokhlov M.A.¹, Makhnenko O.O.², Kostin V.A.¹, Pokliatskyi A.G.¹, Falchenko Iu.V.¹, Khokhlova Yu.A.¹

¹The E.O. Paton Electric Welding Institute, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Kyiv Academic University, 36 Acad, Vernatskyi str., 03142, Kyiv

Experimental laboratory equipment for friction stir welding (FSW) as a result of working out the optimal welding modes at different linear velocities allows producing high-quality butt joints from thin ductile metals. With the development of new mathematical methods for modeling thermodeformational processes, it became possible to analyze the stress-strain state and thermo-mechanical processes occurring in the FSW joint zone, which is necessary for predicting the operational properties, strength and service life of welded structures made of thin metal. Using mathematical models and finite element analysis, the temperature distributions from the volume heat source at FSW were visualized, and the residual deformations and stresses in the zone of butt-welded joints of thin sheets of magnesium alloys were numerically determined. In the future, it is advisable to determine the effective balance of the linear speed and the rotation speed of the FSW tool to obtain better homogeneity of the weld structure and reduce heat input into the metal during welding.

Key words: magnesium alloys, friction stir welding, microstructure, modulus of elasticity, temperature distributions, residual stresses, plastic deformations

Отримано 07.03.2024

Отримано у переглянутому вигляді 16.04.2024

Прийнято 18.05.2024

4th Symposium on Materials and Additive Manufacturing

Additive 2024

12 - 14 JUNE 2024
HYBRID SYMPOSIUM - BREMEN, BERLIN & ONLINE

The 4th Symposium on Materials and Additive Manufacturing combines manufacturing and materials-related aspects, focusing on both the current state of science and implementation in practical applications.

<https://dgm.de/am/2024/symposium/scope>