

ДИFUЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МА2-1 ЧЕРЕЗ ПРОМІЖНИЙ ПРОШАРОК З ЦИНКУ

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, В.А. Костін, О.Л. Пузрін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: omega06@ukr.net

У статті представлено результати досліджень з дифузійного зварювання в вакуумі магнієвого сплаву МА2-1. При зварюванні використовували різні технологічні прийоми: зварювання у вільному стані та із застосуванням формуючих матриць, зварювання без прошарків і з прошарком з цинку. Встановлено, що при зварюванні у вільному стані без прошарку за температури 400 °С при тривалості процесу менше 60 хв отримати з'єднання не вдається. Підвищення температури або тривалості зварювання призводить до значного росту зерна. Використання прошарку з цинку товщиною 250 мкм і режиму зварювання: $T = 320$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв дозволяє отримати з'єднання. Аналіз хімічного складу різних ділянок зони з'єднання показує, що внаслідок розвитку дифузійних процесів в стик у процесі зварювання в прошарку з цинку на відстані 2...3 мкм від лінії контакту магній/цинк формуються пори з вмістом магнію на рівні 17,8...20,12 мас. %. У центральній частині зони з'єднання хімічний склад металу близький до складу чистого цинку. Використання при зварюванні на режимі: $T = 340$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв формуючих матриць і проміжного прошарку з цинку, який знаходиться в твердо-рідкому стані, дозволяє отримати з'єднання без дефектів за рахунок локалізації пластичної деформації в стик. За результатами металографічних досліджень в стик спостерігаються формування спільних зерен та залишків прошарку у вигляді дисперсних часток розміром 15...50 мкм, з хімічним складом $Mg-4,53Al-0,20Mn-63,49Zn$, мас. %, які мають витягнуту неправильну форму. Бібліогр. 17, рис. 4.

Ключові слова: дифузійне зварювання в вакуумі, магнієвий сплав, проміжний прошарок, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Магній є одним з найбільш поширених елементів у земній корі. Він є найлегшим з усіх конструкційних металів. Його щільність 1,74 г/см³ учетверо нижча ніж у сталі і на третину – ніж у алюмінію. Завдяки низькій щільності та високим питомим механічним властивостям застосування магнію набуває все більшого поширення в різних сферах промисловості, таких як автомобілебудування (рульові колеса, каркаси сидінь, корпуси рульової колонки, корпуси подушки безпеки водія, керма тощо), аерокосмічна промисловість (деталі коробки передач турбовентиляторного двигуна, корпус компресора двигуна, корпус трансмісії тощо), медицина (імпланти), електронне обладнання (корпуси мобільних телефонів, комп'ютерів, ноутбуків, фотокамер і портативних медіаплеєрів), спорт (рукоятки луків для стрільби з лука, тенісні ракетки, ключки для гольфу, велосипедні рами і шасі роликів ковзанів) ручний інструмент (корпуси ланцюгових пилок, корпуси редукторів і двигунів ручних інструментів, ручки ручних ножиць і ручних дрилів) [1, 2].

Суттєве збільшення виробництва магнію та його сплавів вимагає розробки ефективних методів з'єднання. Відомо, що зварювання плавленням призводить до розміцнення магнієвих сплавів у зоні з'єднання, формування швів з крупнокристалічною структурою та супроводжуються появою пор, мікротріщин оксидних плівок і тріщини,

утворення яких спричинене розплавленням і наступною кристалізацією металу [3, 4].

Дифузійне зварювання в цьому плані є привабливою технологією, так як дозволяє уникнути утворення дефектів, які часто виникають при застосуванні способів зварювання плавленням. Відповідно до літературних джерел при зварюванні без проміжних прошарків за температури нижчій за 420 °С дифузійні процеси в стик ідуть загальмовано, чітко проглядається лінія контакту; міцність на зріз таких зразків низька. Застосування вищої температури (450...490 °С) у поєднанні з більшою тривалістю зварювання (90...120 хв) призводить до надлишкового росту зерна і, як наслідок, падіння механічних властивостей з'єднань [5, 6].

Використання проміжних прошарків дозволяє отримати бездефектні з'єднання, проте температура зварювання при цьому залишається високою. Так, зварювання через прошарок зі срібла виконують при 480...500 °С [7, 8], міді – при 480...530 °С [9, 10], нікелю – при 515...520 °С [11, 12].

Наведені приклади вказують на необхідність застосування проміжних прошарків, які б наряду з активацією поверхонь дозволяли проводити процес при нижчих температурах. До таких перспективних матеріалів можна віднести прошарки з чистого цинку.

Метою досліджень було встановлення впливу прошарку з цинку при дифузійному зварюванні

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>, Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0003-0625-2113>, Пузрін О.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

© Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, В.А. Костін, О.Л. Пузрін, 2023

магнієвого сплаву МА2-1 на формування структури та властивостей зварних з'єднань.

Матеріали та методика. Дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) магнієвого сплаву МА2-1 ($\text{Mg} - 3,8-5,0 \text{ Al} - 0,8-1,5 \text{ Zn} - 0,3-0,7 \text{ Mn}$, мас. % [13]) проводили в установці П-115 при температурі 250...560 °С, тиску 10 МПа, тривалості процесу 15...60 хв, вакуум у камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Зварювання пластин розміром $15 \times 10 \times 1,5$ мм проводили, як у вільному стані, так із використанням формуючих матриць. Зварювання у вільному стані передбачає вільну деформацію зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання. При цій схемі зварювання відбувається деформація всього зразка. При зварюванні з використанням формуючих матриць (примусове деформування) забезпечуються умови для локалізації пластичної деформації в зоні з'єднання зразків. Оксидну плівку з контактних поверхонь зразків видаляли шляхом механічної зачистки шабером, після чого їх знежирювали в етиловому спирті. В якості проміжного прошарку використовували фольгу з чистого цинку товщиною 250 мкм.

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань проводили на поперечних шліфах на металографічному оптичному мікроскопі «Neophot-32» та скануючому електронному мікроскопу JEOL JSM-840 у режимі вторинних електронів (SEI). Електронний мікроскоп оснащено комбінованою системою енергодисперсійного мікроаналізу INCA PentaFet x3. Підготовка шліфів проводилась за стандартною методикою на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Полірування зразків проводили до 14 класу чистоти поверхні. Розмір зерна визначали лінійним методом, за допомогою окуляр-мікрометра, використовуючи від 10 до 20 полів зору. Твердість фазових складових вимірювали за методом Віккерса на твердомірі М-400, фірми «Лесо». Навантаження складало 1Н (100 гр), час прикладення навантаження 10 с.

Результати та їх обговорення. Сплав МА2-1 у вихідному стані має волокнисту структуру з не-

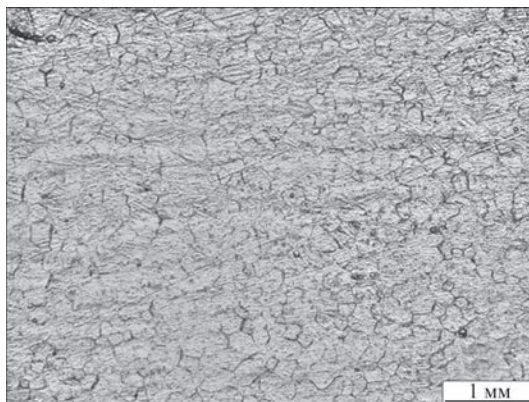


Рис. 1. Мікроструктура сплаву МА2-1 у вихідному стані

рівномірним розподілом зерен за розмірами. В структурі металу переважають зерна з розміром 22...25 мкм, але спостерігаються окремі ділянки з розміром зерна 10...15 мкм (рис. 1). Згідно наукових джерел структура зерен являє собою α -твердий розчин [14]. Границі зерен потовщені, вірогідно, вздовж них виділяється вторинна фаза ($\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ або Mg_4Al_3) [15]. У центральній частині зразка зберігаються сліди текстури прокату. В результаті хімічної неоднорідності матеріалу в центрі зразка спостерігається невелика ділянка з темними виділеннями. Розподіл твердості по площині шліфа має досить неоднорідний характер: на ділянці з хімічною неоднорідністю вона становить 501...591 МПа, в центрі без виділень – 451...453 МПа, по краях зразка, на відстані 100...150 мкм від кромки – 473...507 МПа.

Проведено експерименти з дифузійного зварювання в вакуумі сплаву МА2-1 у вільному стані без використання проміжних прошарків. Показано, що при тривалості зварювання менше 60 хв за температури 400 °С, отримати з'єднання не вдається: руйнування зразків відбувається на стадії підготовки шліфів. Варто відзначити, що при тривалості процесу 15 хв, взаємодія між контактними поверхнями зразків була відсутня. Зі збільшення часу витримки між поверхнями, що зварювались починали спостерігатись окремі ділянки схоплювання (рис. 2, а). Розмір зерен при цьому переважно становить 35...100 мкм, присутні окре-

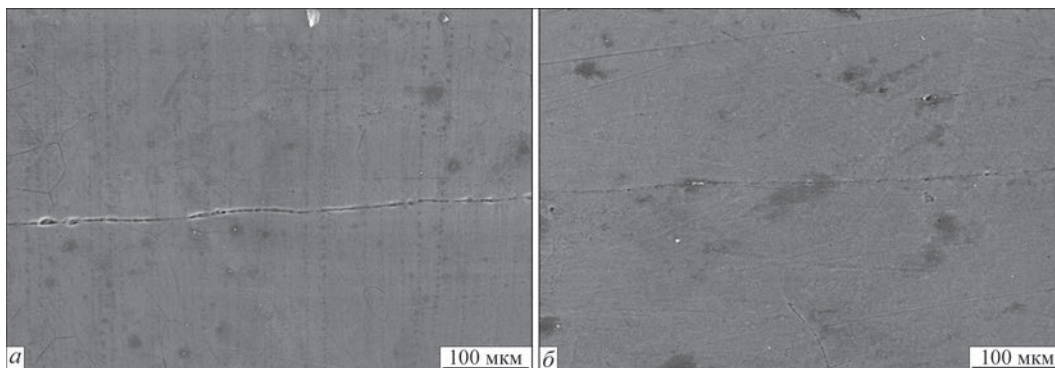


Рис. 2. Мікроструктура зони з'єднання МА2-1 + МА2-1, отриманого ДЗВ на режимі: а – $T = 400$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 60$ хв; б – $T = 560$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 15$ хв

мі зерна розміром 200...320 мкм. Мікротвердість матеріалу коливається в діапазоні 438...566 МПа, при цьому на лінії з'єднання її значення становить 502 МПа.

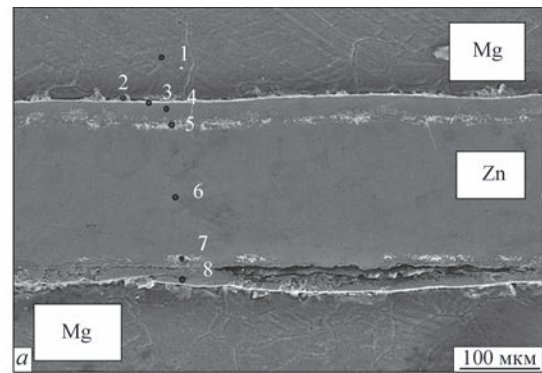
Підвищення температури зварювання навіть до 560 °С не дозволяє отримати якісні з'єднання (рис. 2, б). Після термо-деформаційного циклу зварювання переважним розміром зерен для сплаву МА2-1 є 150...350 мкм, спостерігаються окремі скупчення зерен розміром 60...100 мкм та поодинокі зерна, що проростають на всю товщину зразка. Необхідно відмітити помітну деградацію металу з'єднань: після високотемпературного впливу режиму зварювання внаслідок інтенсивного росту зерен відбувається крихке руйнування магнієвого сплаву. Мікротвердість таких з'єднань має більш однорідний характер і змінюється від 371 МПа в зоні з'єднання до 458 МПа ближче до зовнішніх меж зразка. Це можна пояснити повним проходженням процесу рекристалізації та зникненням слідів текстури з одночасним вирівнюванням хімічного складу.

Відомо, що використання проміжних прошарків при дифузійному зварюванні дозволяє локалізувати пластичну деформацію в стику [16]. Тому в подальших дослідженнях використовували проміжні прошарки у вигляді фольги.

В якості прошарку було обрано цинк товщиною 250 мкм. Використання цинку дозволяє суттєво знизити температуру процесу до 320 °С. Згідно з діаграмою рівноважного стану в системі магній–цинк спостерігається декілька евтектичних реакцій при температурі 340 та 368 °С. Підвищення температури зварювання до температури більшої за евтектичну реакцію призводить до плавлення компонентів та проникнення цинку на всю товщину зразка наслідком чого є подальше крихке руйнування зразка. Зварювання при більш низьких температурах 250...300 °С не забезпечує умови для формування з'єднання.

На рис. 3 представлена мікроструктура (а) і хімічний склад (б) зони з'єднання зразків отриманих на режимі: $T = 320$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв.

Після зварювання товщина прошарку дорівнює ~200 мкм. На основі результатів металографічних досліджень можна зробити висновок, що зварювання магнію з магнієм з використанням прошарку з цинку є досить перспективним, так як дозволяє отримати з'єднання при відносно низьких температурах. Однак, треба зазначити, що в зоні з'єднання з двох сторін від прошарку внаслідок незбалансованих дифузійних потоків між прошарком і основним матеріалом формується ланцюжок поздовжніх пор. Аналіз хімічного складу різних ділянок зони з'єднання показує, що пори формуються в прошарку з цинку на відстані 2...3 мкм



Номер спектру	Вміст елементів, мас. %			
	Mg	Al	Mn	Zn
1	99,39	–	0,09	0,52
2	66,41	0,91	0,21	32,47
3	62,06	1,14	0,28	36,52
4	20,12	–	–	79,88
5	3,27	0,15	0,31	96,27
6	2,26	–	–	97,74
7	–	–	0,10	99,90
8	17,80	–	–	82,13

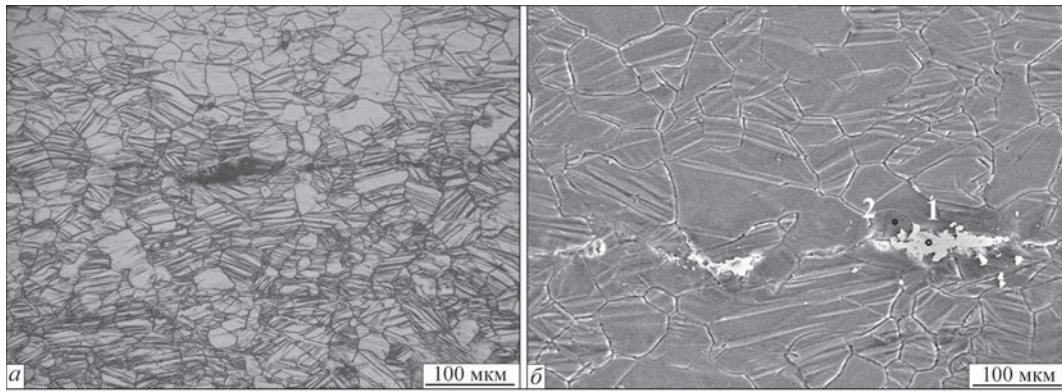
Рис. 3. Мікроструктура (а) і хімічний склад (б) зони з'єднання МА2-1 + Zn + МА2-1, отриманого ДЗВ на режимі: $T = 320$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв

від лінії контакту магній/цинк з вмістом магнію на рівні 17,8...20,12 мас. %, що відповідає фазі $MgZn_2$ [17]. У центральній частині зони з'єднання (точка б) хімічний склад металу близький до складу чистого цинку ($Zn - 2,26Mg$, мас. %).

У структурі металу виявлена різнозернистість з великою кількістю двійників які розташовуються на відстані 500 мкм від шву у глиб металу з більш дрібним зерном 30...100 мкм. На більшій глибині зерна мають розмір 100...200 мкм з поодинокими двійниками. Мікротвердість з'єднання має досить однорідний характер окрім ділянок, в яких сформувалась фаза $MgZn_2$, тут відбувається підвищення мікротвердості до 580 МПа, проти 330...458 МПа для інших ділянок зразка.

Подальші дослідження проводили при зварюванні в формуючих матрицях, які забезпечують локалізацію пластичної деформації в зоні з'єднання зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання. На рис. 4 представлена мікроструктура (а, б) і хімічний склад (в) зони з'єднання зразків отриманих в формуючих матрицях на режимі: $T = 340$ °С, $P = 10$ МПа, $t = 30$ хв.

У даному випадку відбувається практично повне видалення цинку зі стику. Причиною цього є проходження процесу зварювання в твердо-рідкому стані. Як показує аналіз мікроструктури в стику відбувається проростання через зону з'єднання спільних зерен, що свідчить про активне протікання дифузійних процесів. У стику спостерігаються окремі дисперсні включення неправильної



Номер спектру	Вміст елементів, мас. %			
	Mg	Al	Mn	Zn
1	31,77	4,53	0,20	63,49
2	98,71	2,51	0,06	1,72

Рис. 4. Мікроструктура (а) і хімічний склад (б) зони з'єднання MA2-1 + Zn + MA2-1, отриманого ДЗВ в формуючих матрицях на режимі: $T = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 30\text{ хв}$

форми спрямовані в напрямку течії металу. Розмір включень становить 15...50 мкм. Білі включення на рис. 4, б відповідно до [17] являють собою фазу $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$. Середній розмір зерен в магнієвому сплаві переважно складає 15...60 мкм, з окремими зернами до 200 мкм. Мікротвердість вздовж зони з'єднання має неоднорідний характер і змінюється в діапазоні 594...660 та 330...479 МПа для ділянок з включеннями фази $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$ і без неї відповідно. Можна припустити, що такий розподіл мікротвердості не нестиме негативний вплив на механічні властивості з'єднання, так як інтерметалідні включення мають дисперсний характер. Мікротвердість в основному металі становить 371... 526 МПа. Проведено оцінку міцності з'єднань на згин, яка показала, що кут згину зразків з прошарком з цинку, отриманих дифузійним зварюванням в формуючих матрицях, становить 180° , на відміну від зразків отриманих без використання проміжного прошарку, руйнування яких відбувається на стадії підготовки шліфів.

Висновки

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що при дифузійному зварюванні в вакуумі сплаву MA2-1 без використання проміжних прошарків отримати якісні з'єднання утруднено.

Проведення зварювання на режимі: $T = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 30\text{ хв}$, – з використанням формуючих матриць і проміжного прошарку з цинку, який знаходиться в твердо-рідкому стані, дозволяє отримати з'єднання без дефектів. За результатами металографічних досліджень в стикі спостерігаються утворення спільних зерен і практично повне видалення прошарку з формуванням витягнутих вздовж лінії з'єднання дис-

персних часток розміром 15...50 мкм з хімічним складом $\text{Mg}-4,53\text{Al}-0,20\text{Mn}-63,49\text{Zn}$, мас. %. Природа і детальне пояснення механізму формування з'єднань через прошарок, що знаходиться в твердо-рідкому стані, під дією локальної пластичної деформації в стикі потребує подальших досліджень.

Список літератури/References

- Manoj Gupta, Nai Mui Ling Sharon (2011) *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Gialanella S., Malandrucolo, A. (2020) *Aerospace Alloys*. Springer, Cham.
- Min, D., Shen, J., Lai, S., et. al. (2009). Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Materials Characterization*, 60 (12), 1583–1590. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.09.010>
- Abbas, M., Khan, A., Ali, M. et. al. (2014) Effect of weld current and weld speed on the microstructure and tensile properties of magnesium alloy specimens during tungsten inert gas. *Technical J.*, 19 (II), 35–39.
- Fei, Lin, Tiepeng, Li, Lulu, Sun, Qingsen, Meng. (2012) A study on vacuum diffusion bonding of as-extruded AZ31 magnesium alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126 (10–14). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.10>
- Fei, Lin, Jie, Li, Hongwei, Zhao et. al. (2013) Experimental Research on Vacuum Diffusion Bonding of As-extruded AZ61 Magnesium Alloy. *Advanced Materials Research*, 788, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.788.34>
- Zhang, Weixiang, Du, Shuangmin (2013) Investigation into Cu-interlayered Diffusion Bonding Trial of AZ31B Alloy. *Advanced Materials Research*, 631–632 (167–171). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.167>
- Torun, O., Karabulut, A., Baksan, B. et. al. (2008) Diffusion bonding of AZ91 using a silver interlayer. *Materials and Design*, 29, 2043–2046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.003>
- Reza, Ghavami, Ayoub, Halvae, Amir, Hadian (2019) Effect of bonding temperature on interface properties of AZ31 magnesium alloys joined by transient liquid phase using silver interlayer. *Materials Research Express*, 6, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>
- Sun, D.Q., Liu, W.H., Gu, X.Y. (2004) Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (Mg–3Al–1Zn) using copper inter-

- layer. *Materials Science and Technology*, **20** (12), 1595–1598. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328413X13789824293506>
11. Jin, Y.J., Khan, T.I. (2012) Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy. *Materials and Design*, **38**, 32–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.039>
 12. AlHaza'a, A.N., Khalil Abdelrazek Khalil, Muhammad A. Shar (2016) Transient liquid phase bonding of magnesium alloys AZ31 using nickel coatings and high frequency induction heat sintering. *J. of King Saud University Science*, **28**, 152–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.09.006>
 13. ГОСТ 14957-76 Сплавы магниевые деформируемые. Марки. *GOST 14957-76 Wrought magnesium alloys. Grades [in Russian]*.
 14. Морозова Г.И. (2008) Фазовый состав и коррозионная стойкость магниевых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **3**, 8–12.
 15. Shi, Z.Z., Zhang, W.Z. (2013) Prediction of the morphology of $Mg_{32}(Al, Zn)_{40}$ precipitates in a Mg–Zn–Al alloy. *Intermetallics*, **39**, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.02.023>
 16. Piskun, N.V., Falchenko, Yu.V., Petrushinets, L.V. (2020) Formation of the structure and mechanical properties of joints of TiAlNb intermetallic alloy in diffusion welding. *The Paton Welding J.*, **2**, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.02.01>
 17. Okamoto, H. (1994) Comment on Mg–Zn (magnesium-zinc). *J. of Phase Equilibria*, **15**, 129–130. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF0266770>

DIFFUSION WELDING OF MAGNESIUM ALLOY MA2-1 THROUGH A ZINC INTERLAYER

Yu.V. Fachenko, L.V. Petrushynets, V.Ie. Fedorchuk, V.A. Kostin, O.L. Puzrin

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

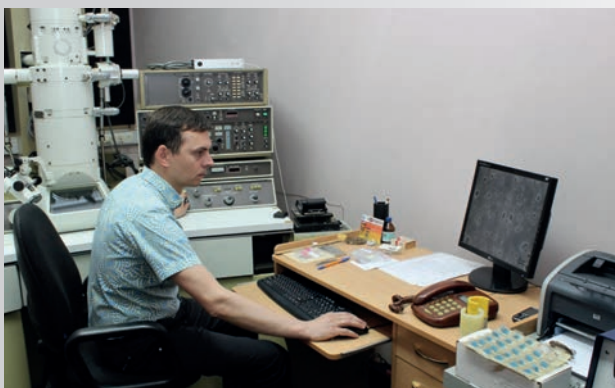
E-mail: omega06@ukr.net

The paper gives the results of investigations on vacuum diffusion welding of MA2-1 magnesium alloy. Different technological measures were used in welding: unsupported welding, welding with application of forming matrices, welding without interlayers and with a zinc interlayer. It is found that it is not possible to produce the joint in unsupported welding without an interlayer at 400 °C temperature and process duration less than 60 min. Increase of welding temperature or time leads to considerable grain growth. Application of 250 ~m zinc interlayer and of the following welding mode: $T = 320$ °C, $P = 10$ MPa, $t = 30$ min allows producing the joint. Analysis of chemical composition in different areas of the joint zone shows that development of diffusion processes in the butt during welding results in pore formation with magnesium content on the level of 17.8 – 20.12 wt. % in the zinc interlayer at 2 – 3 ~m distance from magnesium/zinc contact line. In the central part of the joint zone the metal chemical composition is close to pure zinc composition. Application of forming matrices and an interlayer of zinc in the solid-liquid state in welding in the following mode: $T = 340$ °C, $P = 10$ MPa, $t = 30$ min. allows producing sound joints due to localisation of plastic deformation in the butt joint. Results of metallographic investigations showed formation in the butt joint of common grains and remains of the interlayer in the form of dispersed particles of 15...50 ~m size, with chemical composition of Mg-4.53Al-0.20Mn-63.49Zn, wt. %, having an irregular elongated shape.

Keywords: vacuum diffusion welding, magnesium alloy, interlayer, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 05.07.2023

СТИПЕНДІАТ ВЕРХОВНОЇ РАДИ УКРАЇНИ



Демченко Валерій Леонідович

Доктор хімічних наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, старший науковий співробітник Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України, Лауреат державної Премії України в галузі науки і техніки.

Валерій Демченко працює у відділі зварювання пластмас, який відомий своїми розробками в галузі 3D друку, матеріалів для 3D друку і споріднених технологій. У 2023 р. Демченко В.Л. от-

римав іменну стипендію Верховної Ради України для молодих учених-докторів наук. Робота присвячена розробці технології 3D друку полімерних виробів з противірусною та антимікробною дією. Сьогодні наукові дослідження та боротьба з вірусними інфекціями, зокрема, з великою групою респіраторних захворювань, зумовлених вірусами, займають важливе місце в сучасній медицині. Також розвиваються стійкі до безлічі антимікробних агентів мікроорганізми (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* (синьогнійна паличка), дріжджоподібні гриби *Candida albicans* та ін.). Отже, сьогодні існує потреба в нових матеріалах з вищою противірусною і бактерицидною дією, меншою токсичністю для людини й довкілля (екології, медицини й харчової промисловості). Робота стипендіата спрямована на розробку технології 3D-друку полімерних виробів на основі біополімеру – полілактиду і біметалічних наночастинок Ag/Cu, Ag/ZnO, Cu/ZnO. Отримана технологія може застосовуватись для 3D друку полімерних виробів різного призначення.