

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МА2-1 ЧЕРЕЗ ПРОМІЖНИЙ ПРОШАРОК З ТИТАНУ АБО НІКЕЛЮ

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

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

В статті розглянуто дифузійне зварювання в вакуумі магнієвого сплаву МА2-1. Встановлено, що зварювання магнієвого сплаву без використання проміжних прошарків не забезпечує отримання якісних з'єднань. В стику спостерігаються окремі плоскі пори, витягнуті вздовж лінії з'єднання, наявність яких є причиною низьких механічних властивостей з'єднань. Застосування при зварюванні проміжних прошарків із малолегованих сплавів нікелю або титану та формуючих матриць, які забезпечують збільшення пластичної деформації на контактних поверхнях зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання дозволяють отримати з'єднання без дефектів. При цьому, як показали металографічні дослідження, відбувається значна пластична деформація прошарку (Ni або Ti), який по відношенню до сплаву магнію є більш твердим матеріалом. Визначено механічні властивості зварних з'єднань та їх мікротвердість. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 4.

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

Вступ. Магній є одним з найпоширеніших елементів у земній корі та є найлегшим серед всіх конструкційних металів. З його щільністю $1,74 \text{ г/см}^3$, що вчетверо менша, ніж у сталі і на третину є меншою, ніж у алюмінію, магній знаходить все ширше застосування в різних галузях промисловості, таких як автомобільна, аерокосмічна, медична, виробництво електронного обладнання, спортивного інвентарю та ручного інструменту [1]. Зростання виробництва магнію та його сплавів вимагає розробки ефективних методів з'єднання. Зокрема, відомо, що зварювання плавленням може призвести до розміцнення магнієвих сплавів, формування швів з крупнокристалічною структурою та утворення дефектів, таких як пори, мікровключення оксидних плівок і тріщини [2, 3]. Дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) є привабливою альтернативою, оскільки дозволяє уникнути цих дефектів. Однак, відмічається, що проведення процесу на відносно низьких температурах (до 420°C) не дозволяє інтенсифікувати дифузійні процеси в стику, через що залишається чітка лінія контакту, а міцність таких з'єднань низька. Використання вищих температур і більшої тривалості зварювання призводить до інтенсивного росту зерна в магнії і, як наслідок, до падіння механічних властивостей таких з'єднань [4, 5].

Згідно з літературними даними застосування проміжних прошарків зі срібла, нікелю, міді тощо дозволяє отримати бездефектні з'єднання, але запропоновані температури зварювання при цьому все ще залишаються високими ($480\ldots 530^\circ\text{C}$)

[6–10]. Розглянуті приклади вказують на необхідність пошуку проміжних прошарків, які б, окрім активації поверхонь, дозволили проводити процес при нижчих температурах. В якості таких матеріалів в даній роботі було запропоновано використати фольгу з нікелю або титану.

Метою досліджень було встановлення впливу проміжних прошарків з титану або нікелю при дифузійному зварюванні магнієвого сплаву МА2-1 на формування структури та механічні властивості зварних з'єднань.

Матеріали та методика. Дослідження проводили з зразками магнієвого сплаву МА2-1 ($\text{Mg} - 3,8\text{-}5,0\text{Al} - 0,8\text{-}1,5\text{Zn} - 0,3\text{-}0,7\text{Mn}$, % ваг.) розміром $15 \times 10 \times 1,5 \text{ мм}$ [11]. Зварювання пластин виконували у вільному стані та з використанням формуючих матриць. Параметри ДЗВ задавали наступні: температура 420°C , тиск 10 МПа , тривалість процесу $30\ldots 120 \text{ хв}$, вакуум у камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Безпосередньо перед завантаженням до камери оксидну плівку з контактних поверхонь зразків видаляли шляхом зачистки шабером і знежирювали етиловим спиртом. В якості проміжного прошарку використовували фольгу з малолегованих сплавів титану ВТ1-0 і нікелю Н2 товщиною по 30 мкм .

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань проводили на поперечних шліфах на металографічному оптичному мікроскопі «Neophot-32» та скануючому електронному мікроскопі JEOL JSM-840 у режимі вторинних електронів (SEI). Електронний мікроскоп оснащено комбінованою сис-

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, 2024

темою енергодисперсійного мікроаналізу INCA PentaFet×3. Підготовка шліфів проводилась за стандартною методикою на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності.

Границю міцності основного металу і зварних з’єднань визначали на універсальній машині ЦД4 при статичному розтягуванні плоских зразків з попереднім зачищенням ділянки нахлесту та видаленням грату довкола неї. Дослідження проводились на напускних з’єднаннях 10×130 мм з довжиною напуску 20 мм.

Результати та їх обговорення. Зварювання магнієвого сплаву МА2-1 без використання проміжних прошарків. Попередні результати досліджень показали, що режим зварювання: температура 400 °С і тривалість процесу 60 хв не забезпечують отримання якісних з’єднань (рис. 1, а) [11]. Підвищення температури до 420 °С з одночасним збільшенням часу зварювання вдвічі (120 хв) дозволяє залікувати основну частину дефектів в стику (рис. 1, б). При цьому формується зона з’єднання з чіткою лінією розділу без проростання спільних зерен через неї, на деяких ділянках продовжують спостерігатися окремі плоскі пори, витягнуті вздовж лінії з’єднання, наявність яких, а також відсутність проростання загальних зерен є причиною низьких механічних властивостей таких з’єднань, міцність яких знаходиться на

доволі низькому рівні і становить лише 50 % від міцності вихідного матеріалу (табл. 1).

Подальші дослідження проводили з використанням проміжних прошарків з фольги з нікелю або з титану. Проведення серії експериментів дозволило встановити, що оптимальним режимом зварювання через запропоновані прошарки є температура 420 °С, тиск 10 МПа, тривалість витримки 30 хв.

Зварювання магнієвого сплаву МА2-1 через проміжний прошарок з нікелю. При зварюванні магнієвого сплаву МА2-1 через фольгу з нікелю відбувається взаємодія прошарку з основним металом з формуванням фазових виділень системи Mg–Ni (рис. 2, а). Зона з’єднання між фольгою і основним матеріалом характеризується наявністю окремих дефектів у вигляді пор. Мікротвердість зразків по площині пластин МА2 становить 580...732 МПа, в проміжному прошарку – 1680 МПа.

Подальші дослідження було запропоновано проводити ДЗВ в формуючих матрицях, так як вони забезпечують збільшення пластичної деформації на контактних поверхнях зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання [12].

При проведенні процесу ДЗВ в формуючій матриці спостерігається неоднорідне стоншення фольги місцями до ~ 15 мкм (рис. 2, б), а також її розриви на окремих ділянках внаслідок спрямованої пластичної деформації матеріалу в стику під

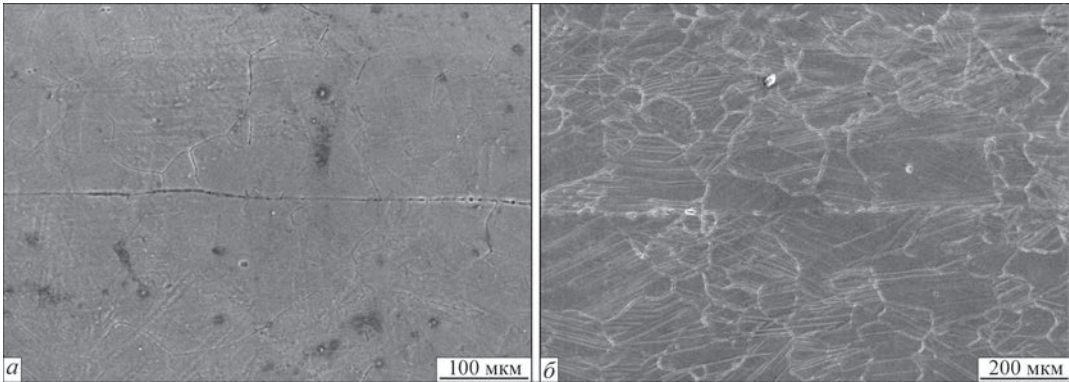


Рис. 1. Мікроструктура зони з’єднання МА2-1 + МА2-1, отриманого ДЗВ у вільному стані (а) і в формуючих матрицях (б) на режимі: а – $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 60\text{ хв}$; б – $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 120\text{ хв}$

Таблиця 1. Міцність на розрив магнієвого сплаву МА2-1 у вихідному стані та його зварних з’єднань, отриманих в формуючих матрицях

Номер з/п	Зварне з’єднання	σ_r , МПа	σ_b , МПа	Середнє значення σ_b , МПа
1	МА2-1 основний метал	32,2	221,4	209,7
2	МА2-1 основний метал		220,2	
3	МА2-1 основний метал		193,5	
4	МА2-1 основний метал		203,7	
5	МА2-1 + МА2-1	29,4	107,4	105,5
6	МА2-1 + МА2-1		100,6	
7	МА2-1 + МА2-1		107,1	
8	МА2-1 + МА2-1		106,8	

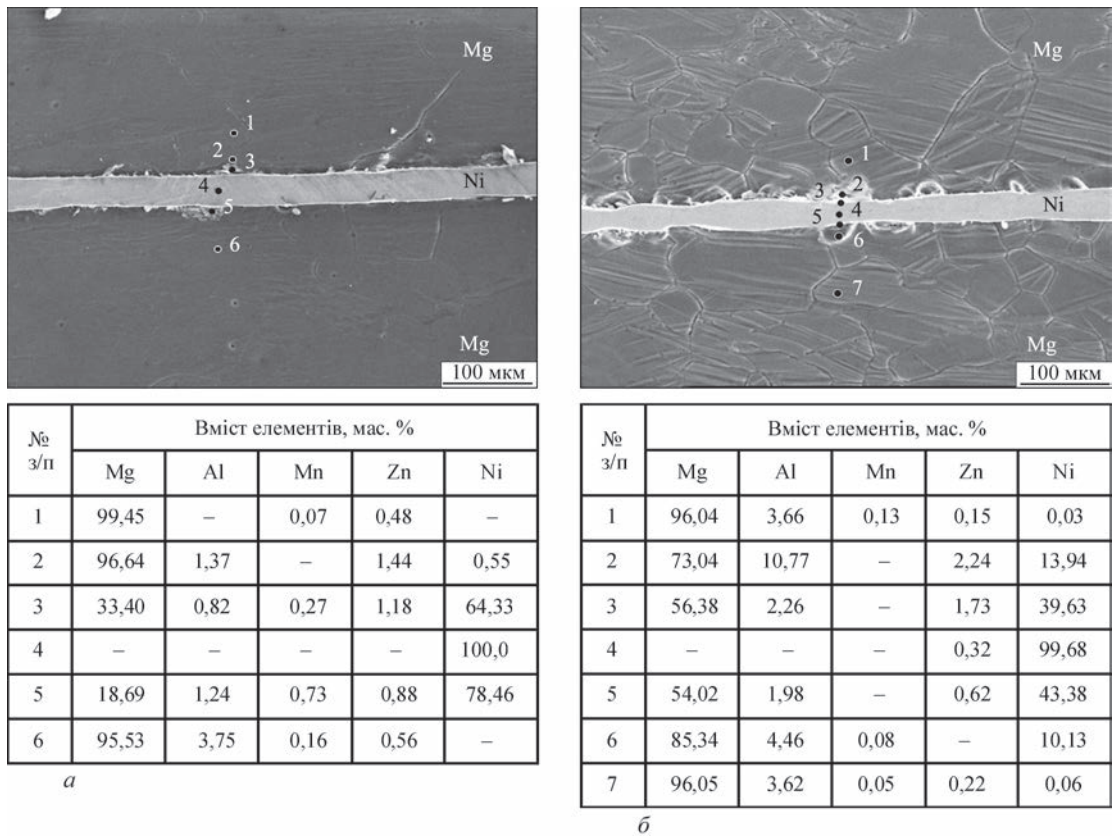


Рис. 2. Мікроструктура і хімічний склад зони з’єднання МА2-1 + Ni + МА2-1, отриманого ДЗВ у вільному стані (а) і в формуючих матрицях (б) на режимі: $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 30\text{ хв}$

час процесу зварювання (рис. 3). Тобто в процесі зварювання в формуючих матрицях окрім загальної деформації зразків відбувається значна пластична деформація прошарку, який по відношенню до сплаву магнію є більш твердим матеріалом.

Також варто відмітити формування фазових вихороподібних виділень вздовж границі контакту, що відповідно до [9], вірогідно, є фазою Mg_2Ni . Мікротвердість зразків по площині шліфа змінюється доволі неоднорідно і становить 356...779 МПа на ділянках основного металу, 490...610 МПа – в дифузійній зоні сплав МА2-1/сплав Н2, 1680...1750 МПа – в проміжному прошарку. Міцність на розрив таких з’єднань є вищою від зразків, отриманих без проміжних прошарків

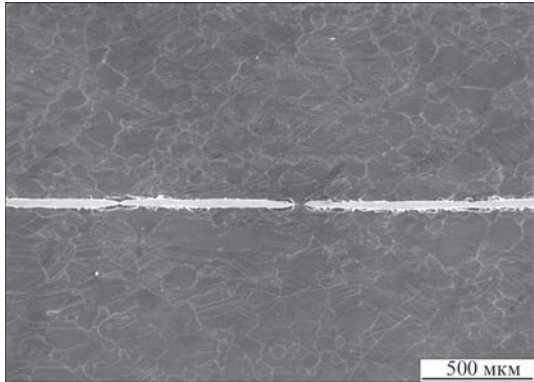


Рис. 3. Мікроструктура ділянки зони з’єднання МА2-1 + Ni + МА2-1 з характерними розривами проміжного прошарку

(табл. 1), середні значення якої дорівнюють $\sigma_{\text{в}} = 131\text{ МПа}$ (табл. 2 п. 1–4), що становить 62 % від міцності вихідного матеріалу.

Зварювання магнієвого сплаву МА2-1 через проміжний прошарок з титану. Згідно з [13] в системі Mg-Ti не утворюються інтерметалідні сполуки, тому титан є більш перспективним матеріалом для використання в якості проміжного прошарку.

В з’єднаннях, отриманих у вільному стані, аналогічно до зразків з нікелем в стику спостерігаються окремі пори вздовж лінії контакту МА2-1/Ті (рис. 4, а). Товщина проміжного прошарку залишається на рівні вихідної фольги. Мікротвердість зразків по площині пластин МА2 становить 526...767 МПа, в проміжному прошарку – 1920...2100 МПа.

Використання формуючих матриць дозволяє отримати бездефектні з’єднання (рис. 4, б). В цьому випадку зона з’єднання також має хвилеподібний характер з окремими розривами прошарку з титану та його стоншенням на окремих ділянках до $\sim 20\text{ мкм}$. Розподіл мікротвердості подібний до зразків, отриманих через проміжний прошарок з нікелю: 356...757 МПа – в основному металі, 610 ... 696 МПа – поблизу границі розділу сплав МА2-1/сплав ВТ1-0, 1750...1920 МПа – в проміжному прошарку. Міцність на розрив при цьому збільшується до $\sigma_{\text{в}} = 143,1\text{ МПа}$ (табл.2 п. 5–8), що становить 68 % від відповідного значення для вихідного магнієвого сплаву.

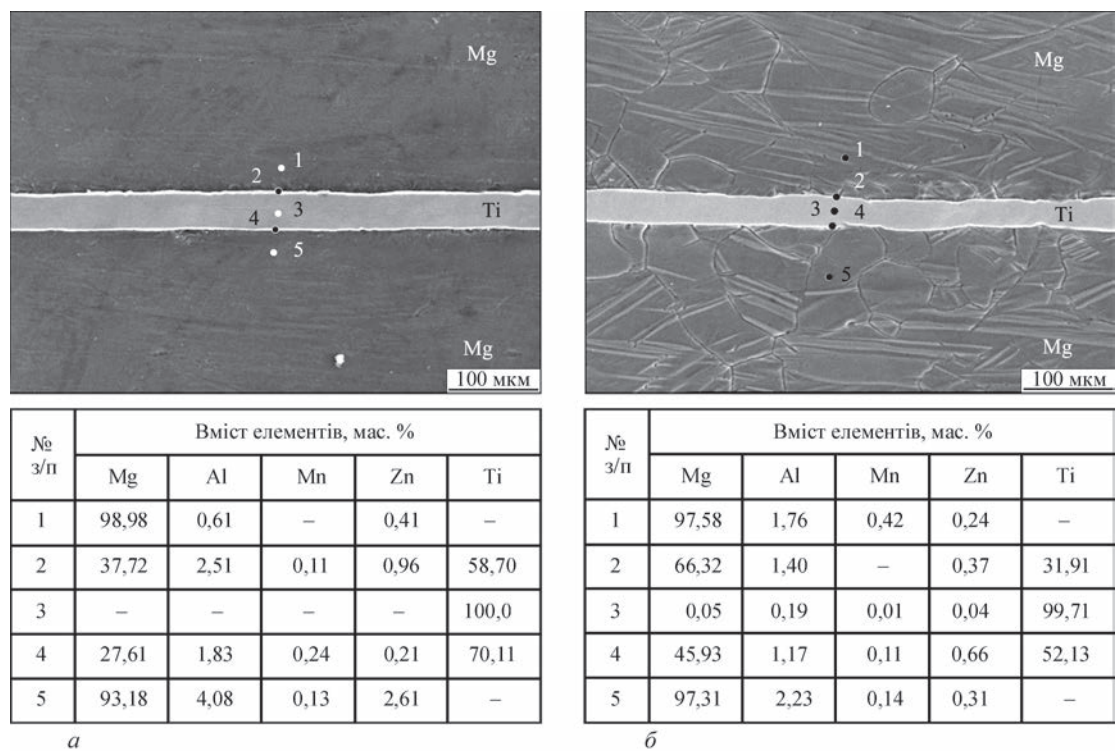


Рис. 4. Мікроструктура і хімічний склад зони з’єднання MA2-1 + Ti + MA2-1, отриманого ДЗВ у вільному стані (а) і в формуючих матрицях (б) на режимі: $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 30\text{ хв}$

Таблиця 2. Міцність на розрив з’єднань з магнієвого сплаву MA2-1, отриманих при зварюванні в формуючих матрицях через проміжні прошарки зі сплавів титану та нікелю

Номер з/п	Зварне з’єднання	σ_z , МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Середнє значення $\sigma_{\text{в}}$, МПа
1	MA2-1 + Ni + MA2-1	48,2	131,2	131,0
2	MA2-1 + Ni + MA2-1		129,3	
3	MA2-1 + Ni + MA2-1		141,8	
4	MA2-1 + Ni + MA2-1		121,8	
5	MA2-1 + Ti + MA2-1	49,1	134,7	143,1
6	MA2-1 + Ti + MA2-1		139,8	
7	MA2-1 + Ti + MA2-1		158,2	
8	MA2-1 + Ti + MA2-1		139,8	

Висновки

1. Встановлено, що зварювання магнієвого сплаву без використання проміжних прошарків не забезпечує отримання якісних з’єднань. В стик спостерігаються окремі плоскі пори, витягнуті вздовж лінії з’єднання, наявність яких є причиною низьких механічних властивостей з’єднань.
2. Застосування при зварюванні проміжних прошарків із малолегованих сплавів нікелю H2 та титану BT1-0 товщиною 30 мкм та формуючих матриць, які забезпечують збільшення пластичної деформації на контактних поверхнях зразків в процесі термо-деформаційного циклу зварювання, дозволяють отримати з’єднання без дефектів.
3. Як свідчать результати металографічних досліджень при зварюванні в формуючих матрицях спостерігається нерівномірне зменшення товщини фольги місцями до 15...20 мкм, а на деяких ділянках і її розриви, що може бути наслідком спрямо-

- ваної пластичної деформації матеріалу в стикі під час процесу зварювання.
4. Виходячи з результатів металографічних досліджень та визначення механічних властивостей зразків використання прошарку з титану більш перспективне. При використанні прошарку з нікелю в стикі вздовж границі Ni–Mg спостерігається утворення фазових вихороподібних виділень, що вірогідно, є фазою Mg_2Ni . В зразках, отриманих в формуючих матрицях з використанням прошарку з титану дефектів не виявлено. Міцність на розрив для з’єднань, отриманих з використанням прошарку з нікелю становить 62 % ($\sigma_{\text{в}} = 131\text{ МПа}$), а для прошарку з титану відповідно становить 68 % ($\sigma_{\text{в}} = 143,1\text{ МПа}$) від значення міцності для вихідного матеріалу.

Список літератури

1. Gialanella, S., Malandrucolo, A. (2020) *Aerospace Alloys*. Springer, Cham.
2. Min, D., Shen, J., Lai, S., Chen, J. (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:10.1016/j.matchar.2009.09.010.
3. 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 Journal, University of Engineering and Technology Taxila*, 19(II), 35–39.
 4. Lingxiao, Ouyang, Yunwei, Gui, Quanan, Li, Yunqiang, Fan (2021) Isothermal compression bonding mechanism and mechanical properties of WE43 magnesium-rare earth alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 822(3), 141664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141664>
 5. Fei Lin, YaXin Tian, Zhitong Chen et al. (2015) Diffusion Bonding and Post-Weld Heat Treatment of Extruded AZ91 Magnesium Alloys. *Metals, Alloys, Coatings*, 21(4). DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.4.9699>
 6. Sun, D.Q., Gu, X.Y., Liu, W.H. (2005) Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (Mg–3Al–1Zn) using aluminium interlayer. *Materials Science and Engineering: A*, 391(1–2), 29–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.008>
 7. Ghavami, R., Halvae, A., Hadian, A. (2019) Effect of bonding temperature on interface properties of AZ31 magnesium alloys joined by transient liquid phase using silver interlayer. *Materials Research Express*, 6, 116519, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>
 8. Abdulaziz Nasser AlHaza, Muhammad Ali Shar, Anas Mahmoud, Hiroshi Nishikawa (2018) Transient Liquid Phase Bonding of Magnesium Alloy AZ31 Using Cu Coatings and Cu Coatings with Sn Interlayers. *Metals*, 8(1), 60. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8010060>
 9. AlHaza, 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>
 10. 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>
 11. Falchenko, Yu.V., Petrushynets, L.V., Fedorchuk, V.Ie. et al. (2023) Diffusion welding of magnesium alloy MA2-1 through a zinc interlayer. *The Paton Welding J.*, 9, 38–42. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.09.06>
 12. Falchenko Yu.V., Muravejnik A.N., Kharchenko G.K., Fedorchuk V.E., Gordan G.N. (2010) Pressure welding of micro-dispersed composite material AMg5 + 27 % Al₂O₃ with application of rapidly solidified interlayer of eutectic alloy Al + 33 % Cu. *The Paton Welding J.*, 2, 7–10.
 13. Murray, J.L. (1986) The Mg–Ti (Magnesium–Titanium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 7, 245–248. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02868999>
 2. Min, D., Shen, J., Lai, S., Chen, J. (2009) Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Mater. Charact.*, 60(12), 1583–1590. DOI:10.1016/j.matchar.2009.09.010.
 3. 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., University of Engineering and Technology Taxila*, 19(II), 35–39.
 4. Lingxiao, Ouyang, Yunwei, Gui, Quanan, Li, Yunqiang, Fan (2021) Isothermal compression bonding mechanism and mechanical properties of WE43 magnesium-rare earth alloy. *Mater. Sci. and Engin.: A*, 822(3), 141664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141664>
 5. Fei Lin, YaXin Tian, Zhitong Chen et al. (2015) Diffusion bonding and post-weld heat treatment of extruded AZ91 magnesium alloys. *Metals, Alloys, Coatings*, 21(4). DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.4.9699>
 6. Sun, D.Q., Gu, X.Y., Liu, W.H. (2005) Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (Mg–3Al–1Zn) using aluminium interlayer. *Mater. Sci. and Engin.: A*, 391(1–2), 29–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.008>
 7. Ghavami, R., Halvae, A., Hadian, A. (2019) Effect of bonding temperature on interface properties of AZ31 magnesium alloys joined by transient liquid phase using silver interlayer. *Materials Research Express*, 6, 116519, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>
 8. Abdulaziz Nasser AlHaza, Muhammad Ali Shar, Anas Mahmoud, Hiroshi Nishikawa (2018) Transient liquid phase bonding of magnesium alloy AZ31 using Cu coatings and Cu coatings with Sn interlayers. *Metals*, 8(1), 60. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8010060>
 9. AlHaza, 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>
 10. 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>
 11. Falchenko, Yu.V., Petrushynets, L.V., Fedorchuk, V.Ie. et al. (2023) Diffusion welding of magnesium alloy MA2-1 through a zinc interlayer. *The Paton Welding J.*, 9, 38–42. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.09.06>
 12. Falchenko, Yu.V., Muravejnik, A.N., Kharchenko, G.K., Fedorchuk, V.E., Gordan, G.N. (2010) Pressure welding of micro-dispersed composite material AMg5 + 27 % Al₂O₃ with application of rapidly solidified interlayer of eutectic alloy Al + 33 % Cu. *The Paton Welding J.*, 2, 7–10.
 13. Murray, J.L. (1986) The Mg–Ti (Magnesium–Titanium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 7, 245–248. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02868999>

References

DIFFUSION WELDING OF MAGNESIUM ALLOY MA2-1 THROUGH THE INTERMEDIATE LAYER OF TITANIUM OR NICKEL

Iu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, V.E. Fedorchuk, V.A. Kostin, O.L. Puzrin

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Vacuum diffusion welding of magnesium alloy MA2-1 is considered in the paper. It was found that welding of the magnesium alloy without using intermediate layers does not ensure formation of high-quality joints. Separate flat pores, elongated along the joint line, are observed in the joint, causing low mechanical properties of the joints. Using intermediate layers made of low-alloy nickel or titanium alloys and forming matrices during welding, which increase plastic deformation on the contact surfaces of the samples during the thermal-deformation welding cycle, allows producing joints without defects. Metallographic studies show significant plastic deformation of the intermediate layer (Ni or Ti), which is a harder material compared to the magnesium alloy. The mechanical properties and microhardness of the welded joints were determined. 13 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: vacuum diffusion welding, magnesium alloy, intermediate layer, microstructure, mechanical testing

Отримано 16.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 03.09.2024

Прийнято 14.10.2024