

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЮ З МАГНІЄМ ЗА ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Л. В. ПЕТРУШИНЕЦЬ¹, В. Є. ФЕДОРЧУК¹, Л. В. МИХАЙЛОВ²,
Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО¹, О. О. НОВОМЛИНЕЦЬ³, С. О. ВОРОНІН¹

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ;

³ Національний університет "Чернігівська політехніка"

Досліджено вплив температури та хімічного складу проміжних прошарків на формування структури зварних з'єднань зі сплавів алюмінію АМг2 та магнію МА2-1. Встановлено, що під час термодформаційного циклу зварювання при $T = 400^\circ\text{C}$ між сплавами магнію і алюмінію формується дифузійна зона завтовшки $\sim 80\ \mu\text{m}$ з мікротвердістю в центральній частині 2160 МПа, де і відбувається розтріскування зварного з'єднання. Для зменшення інтенсивності дифузійних процесів у стикі і запобігання утворенню між сплавами крихких інтерметалідних фаз як бар'єрних прошарків використано фольгу з нікелю або титану завтовшки 30 μm . У з'єднаннях магнію з алюмінієм, отриманих з використанням прошарку з титану, інтерметалідні шари не утворюються. Механічними випробуваннями зразків на згин та розтяг встановлено, що максимальною міцністю володіють з'єднання магнію з алюмінієм ($\sigma_B = 138\dots 142\ \text{MPa}$), отримані за використання прошарків з титану.

Ключові слова: дифузійне зварювання, алюмінієвий сплав, магнієвий сплав, проміжний прошарок, мікроструктура, механічні властивості.

The influence of temperature and chemical composition of intermediate layers on the formation of welded joints structure made of AMg2 aluminum and MA2-1 magnesium alloys is investigated. It is found that during thermo-deformation welding cycle at $T = 400^\circ\text{C}$, a diffusion zone with a thickness of $\sim 80\ \mu\text{m}$ is formed between magnesium and aluminum alloys, with a microhardness in the central part of 2160 MPa, where the cracking occurs. To reduce the intensity of diffusion processes at the interface and prevent the formation of brittle intermetallic phases between the alloys, nickel or titanium foil with a thickness of 30 μm was used as a barrier layer. In the magnesium-aluminum joints obtained using a titanium foil layer, intermetallic layers do not form. Mechanical bending and tensile tests showed that the strongest magnesium-aluminum joints ($\sigma_B = 138\dots 142\ \text{MPa}$) were obtained when using titanium layers.

Keywords: diffusion welding, aluminum alloy, magnesium alloy, intermediate layer, microstructure, mechanical properties.

Вступ. Основною проблемою під час зварювання алюмінієвого сплаву з магнієвим є утворення шару крихких інтерметалідних фаз, які негативно впливають на міцність з'єднання [1]. За безпосереднього зварювання плавленням існує підвищена схильність до утворення пор, мікротріщин і окисних включень у шві та зоні сплавлення [2–6]. У шві формуються крихкі інтерметалідні фази такі, як Al_3Mg_2 та $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ [4], а за додаткового введення проміжних прошарків утворення інтерметалідів системи Al–Mg сповільнюється, проте додатково виникають небажані фази між основним металом і матеріалом прошарку [2, 6].

Зварювання в твердій фазі дає змогу краще контролювати утворення інтерметалідів. Дифузійне зварювання завдяки відсутності плавлення основного металу і можливості з'єднувати елементи складної форми, які потребують мінімальної механічної обробки, є найперспективнішим методом для отримання біметалевих Al–Mg мішеней.

Вважають [7–9], що дифузійне зварювання магнію з алюмінієм необхідно здійснювати за температури 430...440°C з витримкою впродовж 60 min, тиск при цьому може коливатись від 29 до 140 МПа до досягнення певної деформації зразків, після якої подальше збільшення тиску вже суттєво не впливатиме на формування з'єднання. В усіх випадках відмічаємо ріст шарів інтерметалідів Al_3Mg_2 і $Al_{12}Mg_{17}$, які призводять до підвищення мікротвердості в зоні з'єднання, при цьому її значення суттєво збільшуються зі застосуванням вищої температури чи довшої тривалості зварювання [8]. Для запобігання утворення інтерметалідів пропонують [10–14] використовувати проміжні прошарки з Ag, Ti, Ni, Zn і Cu.

З огляду на літературні дані вирішено обрати як проміжний прошарок фольгу з нікелю або титану. Мета роботи – встановити вплив хімічного складу проміжних прошарків на формування структури зварних з'єднань (ЗЗ) зі сплаву магнію МА2-1 та алюмінієвого сплаву АМг2 за дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ).

Матеріали і методи досліджень. Дифузійне зварювання магнієвого сплаву МА2-1 (mass%: Mg–3,8...5 Al–0,8...1,5 Zn–0,3...0,7 Mn) з алюмінієвим АМг2 (mass%: Al–1,7...2,4 Mg–0,1...0,5 Mn) здійснювали у вакуумі ($1,33 \cdot 10^{-3}$ Pa) в установці П-115 за температури 340...480°C і тиску 10 МПа впродовж 30 min. Пластичну деформацію заготовок під час зварювання задавали на рівні 40...45%, що відповідає результатам праці [15]. Зварювали у формувальних матрицях, що забезпечувало зростання деформацій зсуву в стику та поліпшення умов зародження та генерування дислокацій [16]. Оксидну плівку видаляли механічною зачисткою відповідних поверхонь шабером та знежирювали в етиловому спирті. Як проміжний прошарок використовували фольгу з малолегованих сплавів титану ВТ1-0 і нікелю Н2 завтовшки 30 μ m кожна.

Досліджували мікроструктуру та розподіл хімічних елементів у ЗЗ на поперечних шліфах за допомогою сканувального електронного мікроскопа Tescan Vega 3 SBH EasyProbe з енергодисперсійним рентгенівським мікроаналізатором Bruker Quantex 610. Мікротвердість окремих ділянок ЗЗ визначали приладом ПМТ-3 за навантаження 0,5 N.

Результати та їх обговорення. *Зварювання магнію з алюмінієм без використання проміжних прошарків.* Експерименти з дифузійного зварювання у вакуумі сплавів МА2-1 і АМг2 без проміжних прошарків виконували за температури 400°C і тиску 10 МПа впродовж 60 min. Металографічний аналіз з'єднань показав, що в результаті взаємної дифузії в стику між магнієм і алюмінієм під час зварювання формуються три шари (рис. 1). Загальна товщина дифузійної зони ~ 80 μ m.

Перший шар, який контактує зі сплавом МА2-1, має товщину 10...15 μ m, хімічний склад Mg–45,6 mass% Al, і відповідно до діаграми стану [17] переважно складається зі суміші фаз $\gamma + \beta$ ($Al_{12}Mg_{17} + Al_3Mg_2$).

Другий шар з хімічним складом Mg–61,4...62,3 mass% Al має товщину 50...55 μ m. За фазовим складом є сумішшю твердого розчину алюмінію в магнії та інтерметаліду $Al_{12}Mg_{17}$ [17]. Він має низьку пластичність, через що ЗЗ розтріскується по тілу прошарку.

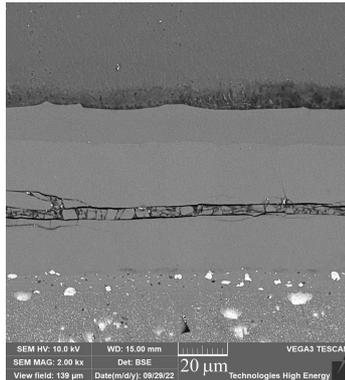


Рис. 1. Мікроструктура зварного з'єднання АМг2 + МА2-1, отриманого ДЗВ без застосування проміжних прошарків за температури 400°C і тиску 10 МПа з витримкою 60 min.

Fig. 1. Microstructure of the welded joint between АМg2 and МА2-1, obtained by diffusion welding in vacuum (DWV) without the use of interlayers, at a temperature 400°C and a pressure of 10 МПа with a holding time of 60 min.

Третій шар, який межує з алюмінієвим сплавом АМг2, має товщину 6...10 μm та містить Mg–64,1 mass% Al. Відповідно до подвійної діаграми стану, він, аналогічно до другого, також складається з твердого розчину алюмінію в магнії та інтерметаліду Al₁₂Mg₁₇ [17], але кількість інтерметалідів у ньому менша.

Мікротвердість у межах дифузійної зони змінюється від 858 МПа біля сплаву МА2-1 до 1155 МПа з боку сплаву АМг2 з максимумом у центральній частині (2160 МПа), де і відбувається розтріскування зварного зразка.

За зварювання за нижчої температури (від $T = 340^{\circ}\text{C}$) взаємодії між контактними поверхнями сплаву магнію та алюмінію не спостерігаємо. Збільшення температури зварювання до 420°C призводить до активнішого утворення в стикі інтерметалідної фази і, як наслідок, крихкого руйнування з'єднань.

Зварювання магнію з алюмінієм через проміжний прошарок з нікелю. Зварювали зразки з використанням проміжного прошарку з нікелю в температурно-му інтервалі 420...480°C, з витримкою 30 min та тиском 10 МПа.

Мікроструктури ЗЗ АМг2 + Ni + МА2-1, отриманих ДЗВ зі застосуванням проміжного прошарку з нікелю за 420 та 440°C, показані на рис. 2. Під дією термомодеформаційного циклу зварювання відбувається незначна взаємодія проміжного прошарку зі зварювальними сплавами, внаслідок чого товщина зони з'єднання залишається на рівні товщини прошарку з нікелю. Як бачимо, за цих температур зварювання в стикі між прошарком з нікелю та магнієм утворюється шар інтерметаліду, який, відповідно до праці [12], є фазою Mg₂Ni. За температури 420°C характер розподілу інтерметаліду між шаром нікелю та магнієм переривчастий, він формується у вигляді окремих частинок розміром 0,8...2 μm. Підвищення температури зварювання до 440°C призводить до формування в стикі суцільного шару інтерметаліду завтовшки 2...4 μm. Дифузійний шар між алюмінієвим сплавом і нікелем за заданих температур процесу не утворюється.

Подальше зростання температури зварювання до 480°C призводить до формування між нікелем та магнієвим сплавом шару інтерметаліду завтовшки ~ 40...80 μm, що призводить до руйнування з'єднання.

За результатами мікроіндентування ЗЗ (див. таблицю) визначено, що зі збільшенням температури зварювання підвищується мікротвердість сплавів на ділянках, які межують з прошарком нікелю. При цьому мікротвердість у межах прошарку нікелю також підвищується. Це свідчить про взаємну дифузію елементів магнієвого, алюмінієвого сплавів і нікелевого прошарку та твердорозчинне зміцнення цих ділянок ЗЗ.

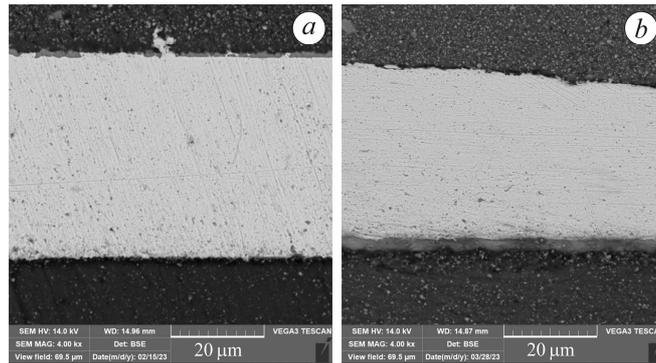


Рис. 2. Мікроструктура з'єднань АМг2 + Ni + МА2-1, отриманих ДЗВ за температур зварювання 420 (а) та 440°С (b).

Fig. 2. Microstructure of AMg2 + Ni + MA2-1 joints obtained by DWV at welding temperatures of 420 (a) and 440°C (b).

Мікротвердість різних ділянок з'єднань, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі

З'єднання	Температура зварювання, °С	Мікротвердість ділянки з'єднання, МПа		
		МА2-1	Проміжний прошарок / дифузійна зона	АМг2
Основний метал АМг2	–	–	–	605
Основний метал МА2-1	–	657	–	–
АМг2 + МА2-1	400	415	858...2160	433
АМг2 + Ni + МА2-1	420	515	1540	460
АМг2 + Ni + МА2-1	440	528	1710	530
АМг2 + Ni + МА2-1	480	540	1980	538
АМг2 + Ti + МА2-1	420	470	1890	440
АМг2 + Ti + МА2-1	440	532	1920	515
АМг2 + Ti + МА2-1	480	542	2100	540

Зварювання магнію з алюмінієм через прошарок з титану. Мікроструктури ЗЗ магнію з алюмінієм, отриманих ДЗВ зі застосуванням проміжного прошарку з титану, показані на рис. 3. Треба відзначити, що, відповідно до результатів праці [18], хімічні з'єднання в системі магній–титан відсутні. Ці метали практично не змішуються і мають мінімальну розчинність один в одному.

На взаємодію алюмінію та титану за працею [19] значною мірою впливають температура та тривалість зварювання. За запропонованих параметрів ДЗВ у ЗЗ інтерметалідні прошарки не утворюються.

Зростання мікротвердості різних ділянок ЗЗ з підвищенням температури зварювання (див. таблицю), аналогічно до ЗЗ з нікелевою фольгою, свідчить про взаємну дифузію елементів магнієвого, алюмінієвого сплаву і титанового прошарку та твердорозчинне зміцнення цих ділянок ЗЗ.

Для оцінки механічних властивостей зразків визначали кут згину та міцність на розтяг. Механічні випробування на згин зразків Mg + Al, отриманих з використанням прошарку з титану та нікелю, показали, що вигин металу до значення $\alpha = 180^\circ$ відбувається без розтріскування. У зразках Mg + Al, отриманих без ви-

користання прошарку, вздовж лінії з'єднання спостерігаємо утворення тріщини, що може свідчити про недостатню пластичність матеріалу внаслідок формування в стику суцільного інтерметалідного шару під час зварювання.

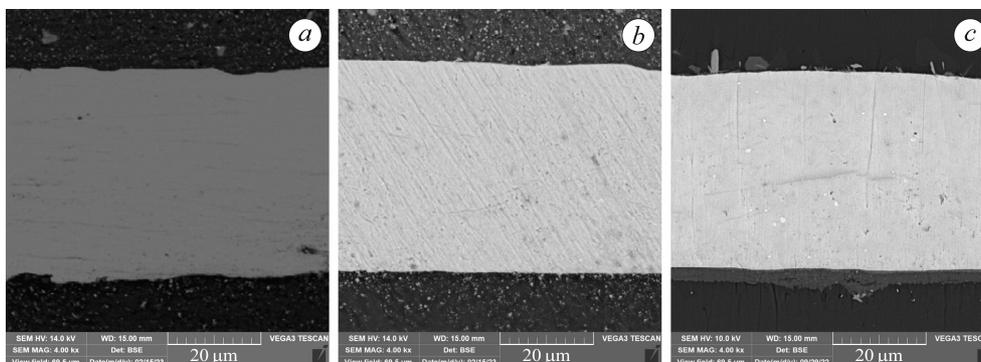


Рис. 3. Мікроструктури зварних з'єднань АМг2 + Тi + МА2-1, отриманих ДЗВ за температур зварювання 420 (а), 440 (b), 480°С (с).

Fig. 3. Microstructures of welded joints of AMg2 + Ti + MA2-1 obtained by DWV at welding temperatures of 420 (a), 440 (b), and 480°C (c).

Дослідження міцності зразків на розтяг показали такі результати: міцність сплавів магнію та алюмінію після відпалу за температури зварювання становить відповідно 190 та 170 МПа, міцність з'єднання Mg + Ti + Al знаходиться в діапазоні 138...142 МПа, а для Mg + Ni + Al $\sigma_B = 130...132$ МПа. Використання запропонованих проміжних прошарків дає змогу отримати з'єднання з міцністю на рівні 77...82% від міцності вихідного алюмінієвого сплаву в стані після відпалу.

ВИСНОВКИ

За зварювання сплавів МА2-1 та АМг2 ($T = 400^\circ\text{C}$) безпосередньо між собою в стику формується дифузійна зона завтовшки ~ 80 μm з різним хімічним складом. Мікротвердість у межах дифузійної зони змінюється від 858 МПа біля сплаву магнію до 1155 МПа з боку сплаву алюмінію з максимумом в центральній частині (2160 МПа), де і відбувається розтріскування зварного з'єднання. В з'єднаннях магнію з алюмінієм, отриманих з використанням прошарку з титану в інтервалі температур 420...480°С, інтерметалідні шари не утворюються. Механічні випробування ЗЗ, отриманих з використанням прошарків з титану та нікелю, на згин показали, що в обох випадках деформація металу до значення $\alpha = 180^\circ$ відбувається без розтріскування зразків.

1. Okamoto H. Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: Al–Mg, Bi–Sr, Ce–Cu, Co–Nd, Cu–Nd, Dy–Pb, Fe–Nb, Nd–Pb, Pb–Pr, Pb–Tb, Pd–Sb, and Si–W // J. of Phase Equilibria and Diffusion. – 2015. – **36**. – P. 183–195.
2. Shah L. H., Gerlich A., and Zhou Y. Design guideline for intermetallic compound mitigation in Al–Mg dissimilar welding through addition of interlayer // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – **94**. – P. 2667–2678.
3. Dissimilar welding of A7075-T651 and AZ31B alloys by gas metal arc plug welding method / M. R. Islam, M. Ishak, L. H. Shah, S. R. A. Idris, and C. Meriç // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – **88**. – P. 2773–2783.
4. Challenges and advances in laser welding of dissimilar light alloys: Al/Mg, Al/Ti, and Mg/Ti alloys / Yaqoob Mohsin Baqer, S. Ramesh, F. Yusof, and S. M. Manladan // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – **95**. – P. 4353–4369.

5. *Investigation of latest generation pulsed fiber laser in dissimilar joining of Al and Mg alloys / Qiong Gao, Sonia Mecco, Kehong Wang, Qi Zhou, Shun Guo, and Supriyo Ganguly // Chinese Optics Letters.* – 2018. – **16**, № 6. – Article number 061401.
6. *Xinze Lv, Hongyang Wang, and Liming Liu.* Influence of welding speed on characteristics of non-axisymmetric laser-tungsten inert gas hybrid welded Mg/Al lap joints with Zn filler // *Materials.* – 2020. – № 13. – Article number 3789.
7. *Mojtaba Jafarian, Alireza Khodabandeh, and Sahebal Manafi.* Evaluation of diffusion welding of 6061 aluminum and AZ31 magnesium alloys without using an interlayer // *Materials & Design.* – 2015. – **65**. – P. 160–164.
8. *Abdolhamid Azizi and Hossein Alimardan.* Effect of welding temperature and duration on properties of 7075 Al to AZ31B Mg diffusion bonded joint // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* – 2016. – **26**, № 1. – P. 85–92.
9. *Effect of joining temperature on microstructure and properties of diffusion bonded Mg/Al joints / Jing Shang, Ke-hong Wang, Qi Zhou, De-ku Zhang, Jun Huang, and Jia-qi Ge // Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* – 2012. – **22**, № 8. – P. 1961–1966.
10. *Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded Mg1/pure Ag foil/1060Al joints / Yi Yu Wang, Qiang Guo Luo, Qiang Shen, Chuan Bin Wang, and Lian Meng Zhang // Key Eng. Mater.* – 2014. – **616**. – P. 280–285.
11. *The effect of interlayer materials on the joint properties of diffusion-bonded aluminium and magnesium / Stefan Habisch, Marcus Böhme, Siegfried Peter, Thomas Grund, and Peter Mayr // Metals.* – 2018. – № 8. – Article number 138.
12. *Effect of Al thin film and Ni foil interlayer on diffusion bonded Mg–Al dissimilar joints / Jian Zhang, Guoqiang Luo, Yiyu Wang, Yuan Xiao, Qiang Shen, and Lianmeng Zhang // J. of Alloys and Compounds.* – 2013. – **556**. – P. 139–142.
13. *Effect of Zn interlayer thickness on the microstructure and mechanical properties of two-step diffusion bonded joint of ZK60Mg and 5083Al / Yangyang Guo, Gaofeng Quan, Lingbao Ren, Baoshuan Liu, Salih Al-Ezzi, and Houhong Pan // Vacuum.* – 2019. – **161**. – P. 353–360.
14. *Javad Varmazyar and Mohammad Khodaei.* Diffusion bonding of aluminum-magnesium using cold rolled copper interlayer // *J. of Alloys and Compounds.* – 2019. – **773**. – P. 838–843.
15. *Pressing of semi-finished Al–Mg–Sc alloy products in isothermal conditions / A. V. Titov, K. B. Balushok, O. P. Ostash, V. A. Titov, V. O. Koreva, S. L. Polyvoda, and R. V. Chepil // Materials Science.* – 2023. – **58**, № 5. – P. 636–642.
16. *Influence of the deformation mode on the force conditions of formation of the surface nanostructure of 40Kh steel / V. I. Kyryliv, V. I. Gurey, O. V. Maksymiv, I. V. Hurey, and Yu. O. Kulyk // Materials Science.* – 2022. – **57**, № 3. – P. 422–427.
17. *Schmid-Fetzer R.* Phase diagrams: the beginning of wisdom // *J. of Phase Equilibria and Diffusion.* – 2014. – **35**. – P. 735–760.
18. *Murray J. L.* The Mg–Ti (Magnesium–Titanium) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams.* – 1986. – № 3. – P. 245–248.
19. *Вплив технологічних особливостей лазерного зварювання титан-алюмінієвих конструкцій на структуроутворення зварних з'єднань / В. Д. Шелягін, А. В. Бернацький, О. М. Берднікова, В. М. Сидорець, О. В. Сіора, С. Г. Григоренко // Металофізика та новітні технології.* – 2020. – **3**, № 42. – С. 363–379.

Одержано 15.02.2024