

## З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ І МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ДИФУЗІЙНИМ ЗВАРЮВАННЯМ (Огляд)

Л.В. Петрушинець<sup>1</sup>, В.Є. Федорчук<sup>1</sup>, Ю.В. Фальченко<sup>1</sup>, О.О. Новомлинець<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [moremia2@ukr.net](mailto:moremia2@ukr.net)

<sup>2</sup>Національний університет «Чернігівська політехніка». 14030, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95. E-mail: [rector@stu.cn.ua](mailto:rector@stu.cn.ua)

Магнієві сплави завдяки низькій щільності та високій питомій міцності є перспективними матеріалами для машинобудування, автомобілебудування та портативної електроніки. Обмеження ширшого застосування обумовлене низькою міцністю та термостійкістю, а також схильністю до корозії даної групи матеріалів. Широке впровадження магнієвих сплавів часто потребує надійного з'єднання з іншими матеріалами, насамперед – з алюмінієвими сплавами. Однак отримання таких з'єднань є технологічно складним через суттєву різницю у фізико-хімічних властивостях даної пари матеріалів, що призводить до утворення крихких фаз і деградації механічних властивостей. У роботі розглянуто можливість використання різних технологічних прийомів при отриманні з'єднань між магнієм і алюмінієм способом дифузійного зварювання. Показано, що зварювання магнієвих сплавів з алюмінієвими без прошарків призводить до значного розкиду в значеннях міцності з'єднань, що обумовлено розбіжностями у використаних авторами публікацій параметрах зварювання (температура, тиск, тривалість процесу). Використання проміжних прошарків, таких як Cu, Zn, Ag, Ni та Sn + Zn істотно впливає на мікроструктуру, склад фаз і механічні властивості з'єднань, що пов'язано з різною схильністю цих металів до формування інтерметалідних фаз у стику. Найвищу міцність на зріз 76,8 МПа отримано при застосуванні прошарку Sn + Zn. Але цей технологічний процес має значну чутливість до коливань температури зварювання, що обумовлено зміною в обсязі рідкої фази між магнієм та алюмінієм і, відповідно, фазового складу зони з'єднання. Таким чином, дифузійне зварювання магнію з алюмінієм залишається складною проблемою, яка потребує подальшого дослідження. Бібліогр. 27, табл. 1, рис. 2.

*Ключові слова:* дифузійне зварювання, магнієвий сплав, алюмінієвий сплав, проміжний прошарок, мікроструктура, міцність

**Вступ.** Магнієві сплави завдяки низькій щільності та високій питомій міцності є перспективними матеріалами для машинобудування та інших галузей, в яких критичним є питання зменшення ваги конструкцій. Наприклад, вони використовуються в портативній електроніці (ноутбуки, мобільні телефони, камери), в якій завдяки поєднанню механічної міцності, здатності до відводу тепла, компактності та 100 % перероблюваності магній має перевагу над пластиком. В автомобілебудуванні магнієві сплави застосовуються в елементах двигуна, трансмісії, корпусах, кронштейнах, рамах, приладових панелях, каркасах сидінь, кермових колесах і колісних дисках тощо, забезпечуючи суттєве зниження маси без втрати функціональності [1, 2].

Попри переваги, такі як: легкість, можливість використання ливарних технологій, екранування електромагнітних хвиль і гасіння вібрацій, магній має суттєві недоліки: низьку міцність, термостійкість і схильність до корозії. Додаткове легування алюмінієм, цинком, цирконієм і рідкісноземельними елементами дозволяє частково подолати ці обмеження, зокрема, підвищити міцність, опір

повзучості та стійкість до високих температур. Проте найсерйознішою проблемою залишається корозія, яка істотно обмежує експлуатацію магнієвих сплавів у різних середовищах [3]. Нанесення тонкого алюмінієвого покриття на магнієві сплави сприяє покращенню корозійної стійкості останніх, оскільки на поверхні алюмінію формується щільна оксидна плівка. Наприклад, у [4] було показано, що холодне напилення на магнієві сплави покриття суміші часточок із чистого алюмінію та нікелю (Al – 40 Ni, ваг. %) завтовшки 240 мкм значно покращує їхню корозійну стійкість, яка суттєво підвищується зі збільшенням часу занурення в розчин з 3,5 % NaCl завдяки утворенню захисного шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Широке впровадження магнієвих сплавів у конструкційні елементи часто потребує надійного з'єднання з іншими матеріалами, насамперед – з алюмінієвими сплавами. Саме комбінація легких магнієвих та алюмінієвих компонентів дозволяє створювати конструкції зі зменшеною масою без втрати експлуатаційних характеристик. Однак отримання таких з'єднань є технологічно складним через суттєву різницю у фізико-хімічних властивостях даної пари матеріалів і можливості утворення крихких фаз зі зменшенням механічних властивостей. Однією з основних проблем при зварюванні магнію з алюмінієм є утворення інтер-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

металідних фаз  $Mg_{17}Al_{12}$  і  $Mg_2Al_3$ , наявність яких суттєво знижує міцність з'єднань, а також стійкість до ударних і циклічних навантажень [5]. У даній роботі були розглянуті способи зварювання в твердій фазі, які забезпечують локалізацію пластичної деформації в стику та сприяють утворенню дрібнозернистих структур у зоні з'єднання, що, в свою чергу, підвищує міцність і довговічність отриманих з'єднань [6]. Збільшення швидкості пластичної деформації, підбір відповідних діапазонів температур проведення процесу, а також проміжних прошарків дозволяє вплинути на склад і розміри інтерметалідних фаз, які утворюються в стику в процесі зварювання, або й взагалі уникнути їхньої появи.

**Мета роботи** – провести аналіз та узагальнення новітніх досягнень у дифузійному зварюванні (ДЗ) магнієвих і алюмінієвих сплавів, визначити особливості проведення процесів, а також вірогідні шляхи усунення типових недоліків.

**Виклад основного матеріалу.** Дифузійне зварювання є одним із ключових способів з'єднання різнорідних металів і сплавів, особливо у випадках, коли традиційні способи зварювання призводять до формування товстого шару крихких інтерметалідних фаз. Завдяки зниженню температури процесу та відсутності розплавлення даний підхід дозволяє отримати якісні з'єднання з високими механічними властивостями. Під час ДЗ можуть застосовуватися як бар'єрні прошарки, що запобігають утворенню небажаних крихких фаз, так і прошарки, які частково або повністю розплавляються (наприклад, на основі Zn та/або Sn), сприяючи змочуванню поверхонь, активації дифузійних процесів і формуванню щільного контакту між металами.

Одним із актуальних напрямів досліджень є вивчення впливу технологічних параметрів дифузійного зварювання на структуру та властивості біметалевих з'єднань сплавів алюмінію та магнію. Аналіз результатів досліджень [7–12] показує, що результат процесу ДЗ кожної конкретної пари сплавів суттєво залежить від обраних температури, тиску та часу витримки. В усіх роботах простежується спільна тенденція: підвищення температури зварювання посилює дифузійну взаємодію між металами, що, у свою чергу, впливає на швидкість утворення інтерметалідних фаз, формування структури зони з'єднання та рівень механічних властивостей.

У [7] досліджували вплив температури на формування біметалевих з'єднань сплавів алюмінію 5083 та магнію AZ31 методом дифузійного зварювання у вакуумі. Процес проводили за 420...450 °C, під тиском 1 МПа протягом 60 хв,

за вакууму  $6 \cdot 10^3$  Па. За температури 420 °C у стику спостерігали лише часткову взаємодію з утворенням окремих ділянок фази  $Al_2Mg_3$  (до 27 мкм). Підвищення температури до 430 °C сприяло формуванню двошарової інтерметалідної зони –  $Al_3Mg_2$  з боку алюмінію та  $Al_{12}Mg_{17}$  з боку AZ31 – загальною товщиною 38 мкм, а також росту зерна в магнієвому сплаві поблизу стику. Подальше збільшення температури призводило до інтенсивнішої взаємодії та формування широкої дифузійної зони (до 600 мкм), яка переважно складається з фази  $Al_{12}Mg_{17}$  і твердого розчину магнію. У сплаві AZ31 з'являлися пори, поява яких пояснюється вищим коефіцієнтом дифузії атомів Mg в Al. За 450 °C на межі контакту внаслідок стрімкого проходження евтектичної реакції відбувається локальне плавлення. Таким чином, надмірне нагрівання погіршує якість з'єднання через формування пористості та крихких фаз. Підвищення температури зварювання з 420 до 440 °C призводить до суттєвого зростання мікротвердості зони з'єднання: з 120 до 224 HV, що перевищує твердість вихідних сплавів (128 HV для Al і 72 HV для Mg). Це свідчить про домінуючий вплив інтерметалідних фаз на зміцнення стику, хоча надмірна їхня кількість зумовлює втрату пластичності.

Подібну залежність виявлено й для сплавів AA7075 та AZ80 [8]. Дослідження проводили при варіюванні температури в діапазоні 350...450 °C, під тиском 10 МПа та з витримкою 15 хв. Оптимальний режим ( $T = 400$  °C,  $P = 10$  МПа,  $t = 15$  хв) забезпечив максимальну міцність на зріз ( $\tau = 26$  МПа). За нижчих температур формування з'єднання є неповним, а за вищих – надмірне зростання шарів  $Mg_2Al_3$  і  $Mg_{17}Al_{12}$  спричиняє зниження міцності. Автори не визначили оптимальну товщину інтерметалідних шарів, хоча саме вона є ключовим чинником забезпечення балансу між міцністю та крихкістю з'єднання.

У [9] досліджували формування з'єднань AZ31 з трьома алюмінієвими сплавами – 5754, 6061 і 7039. Зварювання проводили за 440 °C, 29 МПа, 60 хв, за вакууму  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Незалежно від складу алюмінієвого сплаву формувалася дифузійний шар завтовшки 30...33 мкм, що складався з послідовності фаз:  $Al_{12}Mg_{17}$  (зі сторони AZ31), суміші  $Al_{12}Mg_{17} + Al_3Mg_2$  та шару  $Al_3Mg_2$  (зі сторони алюмінію). Порівняння результатів для різних пар сплавів показало, що хімічний склад компонентів істотно впливає на механічні властивості. Найвищу міцність на зріз ( $\tau = 42$  МПа) мало з'єднання AZ31 + 6061 у порівнянні з парами AZ31 + 7039 ( $\tau = 35$  МПа) і AZ31 + 5754 ( $\tau = 30$  МПа). Це пояс-

нюється нижчою твердістю сплаву 6061, що сприяє кращому приляганню поверхонь і формуванню повноцінного металевого контакту на початковій стадії зварювання.

Публікація [10] присвячена комплексній оцінці впливу основних параметрів дифузійного зварювання на формування з'єднань сплавів AZ31B та AA6061. Дослідження проводили в широких діапазонах температури (375...500 °C), тиску (5...25 МПа) та часу витримки (5...120 хв). Результати 35 експериментів показали, що за температури 400...475 °C, тиску 10...20 МПа та тривалості 5...90 хв забезпечується стабільне формування з'єднання без плавлення. Оптимальна товщина дифузійного шару при цьому становить 5...10 мкм, а максимальна міцність на зріз ( $\tau = 42$  МПа) досягається за умов  $T = 425$  °C,  $P = 20$  МПа,  $t = 40$  хв.

Вплив часу витримки на формування з'єднань AZ31B і 7075 особливо виразно простежується в [11]. ДЗ виконували за температури 430...450 °C, тиску 29 МПа, витримки 60 і 120 хв, вакуумі 0,133 Па. При безпосередньому зварюванні в зоні з'єднання утворювалися три шари інтерметалідів, аналогічні до результатів інших досліджень ( $Al_{12}Mg_{17}$ , суміш фаз  $Al_{12}Mg_{17}$  і  $Al_3Mg_2$ , суміш  $Al_{12}Mg_{17}$  і  $Al_3Mg_2$  з більшим вмістом  $Al_3Mg_2$ ). Показано, що збільшення тривалості процесу з 60 до 120 хв призводить до істотного зростання товщини дифузійної зони з 21...23 мкм до 30 мкм при 430 °C і до 38 мкм при 450 °C, а також спричиняє підвищення мікротвердості з 70 до 176 HV. Утворення товстого інтерметалідного шару призводить до зниження пластичності з'єднань, тому максимальна міцність на зріз ( $\tau = 24$  МПа) досягається при  $T = 430$  °C,  $t = 60$  хв.

Подібна тенденція простежується і для пари сплавів 7075 і AZ31B [12]. Зварювання зразків проводили на режимі, який задавали в наступних діапазонах: температура 393...421 °C, тиск 12...80 МПа, витримка 25...120 хв, вакуум 0,133 Па. Зварні з'єднання були отримати в інтервалі температур 402...421 °C, для всіх значень якого формується дифузійна зона практично однакової товщини (21,26...22,60 мкм). Структура інтерметалідних шарів узгоджується з даними [11], проте додатково встановлено утворення фази  $MgZn_2$  на границі зі сплавом 7075. Оптимальне співвідношення міцності на зріз ( $\tau = 30$  МПа) і мікротвердості в стику (70 HV) забезпечив режим зварювання  $T = 402$  °C,  $P = 29$  МПа,  $t = 60$  хв.

У [13–16] значну увагу приділено впливу термічної обробки до та після зварювання на мікроструктуру вихідних сплавів і їхнього з'єднання. З

метою подрібнення зерна автори [13] вихідні матеріали піддавали рекристалізаційному відпалу при 300 °C. Перебування за даної температури протягом 30...40 хв майже вдвічі зменшило середній розмір зерна в AZ31 (з 21,15 до 12,35 мкм) і на третину – в сплаві 7075 (з 19,62 до 12,81 мкм). Зварювання виконували за температури 430...470 °C, тиску 10 МПа, витримки 60...120 хв, вакууму 18 Па. Подібно до попередніх робіт у зоні з'єднання сформувались три інтерметалідні шари:  $Mg_2Al_3$ ,  $MgAl$  і  $Mg_{17}Al_{12}$ . Максимальна мікротвердість зварних зразків, підданих попередньому відпалу та без нього, знаходиться на одному рівні й становить  $\sim 250$  HV у шарі, що відповідає інтерметаліду  $Mg_{17}Al_{12}$ . Оптимальним режимом визначено  $T = 470$  °C,  $P = 10$  МПа,  $t = 60$  хв, що забезпечило міцність на зріз  $\tau = 38,41$  МПа.

Позитивний вплив попереднього відпалу сплаву 6061 на формування зварного з'єднання алюмінію з магнієм також зазначається в [14]. Зварювання сплавів 6061 + AZ31 виконували за температури 440 °C, тиску 29 МПа, витримки 60...90 хв, вакууму  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Оптимальною визначено тривалість процесу 90 хв. Незалежно від вихідного стану алюмінієвого сплаву в зоні з'єднання, формувались три інтерметалідні шари ( $Al_{12}Mg_{17}$ /суміш  $Al_{12}Mg_{17}$  +  $Al_3Mg_2/Al_3Mg_2$ ) загальною товщиною 25...27 мкм. Міцність на зріз відпалених зразків є майже вдвічі вищою ( $\tau = 32$  МПа), ніж при застосуванні операції попереднього загартування та старіння вихідного алюмінієвого сплаву ( $\tau = 18$  МПа), що пояснюється низькою пластичністю приповерхневих шарів алюмінію і, як наслідок, відсутністю повного фізичного контакту поверхонь матеріалів, що зварювались.

Окремі дослідження були присвячені впливу відпалу на структуру зони з'єднання та механічні властивості зварних зразків.

Ефективність застосування термічної обробки для зварних з'єднань сплаву AZ31 з 6061 показано в [15]. Дифузійне зварювання проводили в середовищі аргону за температури 440 °C, після якого здійснювали відпал при 200...300 °C протягом 60 хв. Після термообробки в зоні з'єднання спостерігаються дві інтерметалідні фази  $Mg_2Al_3$  і  $Mg_{17}Al_{12}$  з одноріднішою мікроструктурою, ніж безпосередньо після зварювання. Найкращі результати отримано після відпалу при 250 °C: міцність на розтяг зросла до  $\sigma_b = 45$  МПа (порівняно з  $\sigma_b = 29$  МПа після зварювання).

У [16] розглядали з'єднання сплавів AZ91 і 6061, зібраних внапуск між двох пластин, які стягували болтами так, щоб мінімізувати тиск пе-

ред нагріванням. ДЗ проводили в електропечі в середовищі аргону за температури 440 °С і витримки 60 хв. Далі ще протягом 60 хв відбувався відпал при 200...300 °С. Після зварювання в стику формуються два інтерметалідні шари  $Al_2Mg$  і  $Al_{12}Mg_{17}$ . Відпал при 200...250 °С впливає несуттєво на товщину зони з'єднання у порівнянні зі станом після зварювання (~65 мкм проти 75...80 мкм), але підвищення температури термообробки до 300 °С призводить до інтенсивного росту інтерметалідних шарів (до 200 мкм). Відпал при 250 °С дозволяє підвищити міцність з'єднань на розтяг майже вдвічі у порівнянні зі зразками після зварювання ( $\sigma_b = 80,3$  МПа проти 42,2 МПа), але призводить до зниження границі текучості (до  $\sigma_{0,2} = 35,5$  МПа проти 40,0 МПа).

Низку публікацій присвячено аналізу мікроструктурних змін у зоні з'єднання, порядку утворення та зростання інтерметалідних фаз під час ДЗ. Зокрема в [17, 18] детально висвітлено особливості формування зони з'єднання при зварюванні алюмінію з магнієм.

У [17] наведено результати досліджень зі зварювання магнієвого сплаву AZ31 з алюмінієвим сплавом 7075. Параметри режиму задавали в наступних інтервалах: температура 430...450 °С, тиск 10...35 МПа, витримка протягом 60 хв, вакуум 13,3 МПа. Щодо рівня вакууму, вірогідно, має місце одруківка: замість «МПа» мають бути «Па». Задля зниження рівня залишкових напружень охолодження з'єднань проводили повільно разом із камерою. За результатами експериментів було запропоновано схему послідовності утворення шарів інтерметалідів в парі Al–Mg (рис. 1), згідно з якою в стику спершу утворюється фаза AlMg (рис. 1, а). Далі внаслідок дифузії атомів Al у напрямку магнієвого сплаву і в міру росту їхньої концентрації відбувається утворення інтерметаліду  $Al_{12}Mg_{17}$  (рис. 1, б). Паралельна дифузія Mg до границі розділу з алюмінієвим сплавом призводить до утворення інтерметаліду  $Al_3Mg_2$  (рис. 1, в). Подальше збільшення часу витримки не призводить до утворення шарів нових фаз, а лише до збільшення товщини вже наявних (рис. 1, г). Опти-

мальним режимом зварювання був визначений наступний:  $T = 440$  °С,  $P = 25$  МПа,  $t = 60$  хв, застосування якого дозволило отримати з'єднання з максимальною міцністю на зріз  $\tau = 38$  МПа.

Автори [18] досліджували зміни мікроструктури зони з'єднання при дифузійному зварюванні магнію з алюмінієм. Зразки чистих металів нагрівали у вакуумній камері до 445 °С і витримували протягом 0...150 хв. На початковій стадії утворення з'єднання контакт між матеріалами відбувається по мікроставуках поверхонь, дифузійні процеси переважно обмежуються самодифузією атомів Al і Mg (рис. 2). Витримка за температури зварювання призводить до інтенсифікації взаємодифузії атомів Al і Mg, унаслідок чого їхня локальна концентрація перевищує границю розчинності в твердому стані. На границі розділу починають формуватися окремі зародки, а далі й суцільні шари інтерметалідів (з боку алюмінію  $Mg_2Al_3$ , від магнію  $Mg_{17}Al_{12}$ ). Через незбалансованість дифузійних потоків профіль інтерметалідних шарів поперемінно змінюється від хвилеподібного до плоского. Унаслідок різниці коефіцієнтів теплового розширення між інтерметалідними фазами та сплавами, що зварюються, на границі розділу утворюється напруження, максимальний градієнт яких досягається на границі розділу Al/ $Al_3Mg_2$ . Оскільки напрям дії напружень розтягу узгоджується з напрямком дифузії атомів Mg, це прискорює їхню дифузію та призводить до утворення пор. Напруження концентруються поблизу пор, внаслідок чого вони можуть стати джерелом розповсюдження тріщин.

У ряді досліджень [19–27] з метою підвищення механічних властивостей з'єднань і зниження схильності до утворення інтерметалідних сполук системи Al–Mg застосовували бар'єрні проміжні прошарки. Ефективність такого підходу визначається як вибором матеріалу бар'єрного шару, так і його товщиною.

У [19] при зварюванні сплавів AZ80 і 7075 в якості проміжного прошарку на AZ80 наносили покриття з алюмінію невідомої товщини. Параметри режиму задавали наступні: температура 325...450 °С, тиск 10 МПа, витримка 15 хв. Мак-

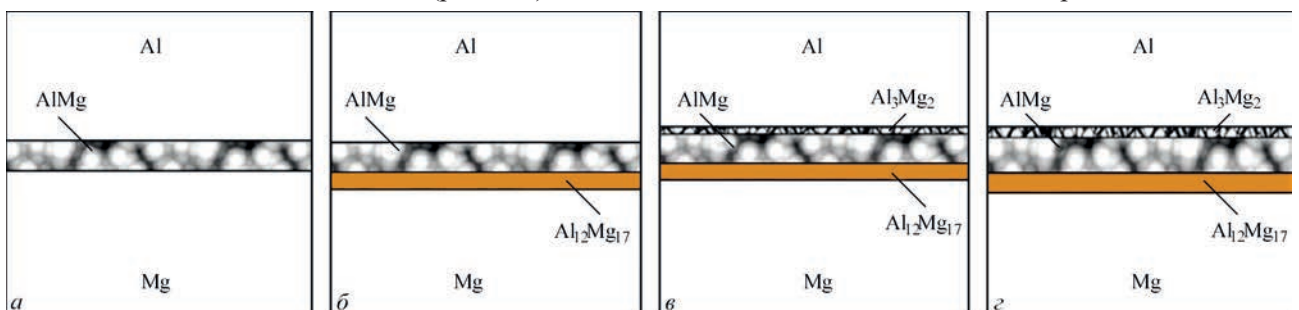


Рис. 1. Схематичне зображення послідовності утворення шарів інтерметалідів при дифузійному зварюванні сплавів Al і Mg [17]

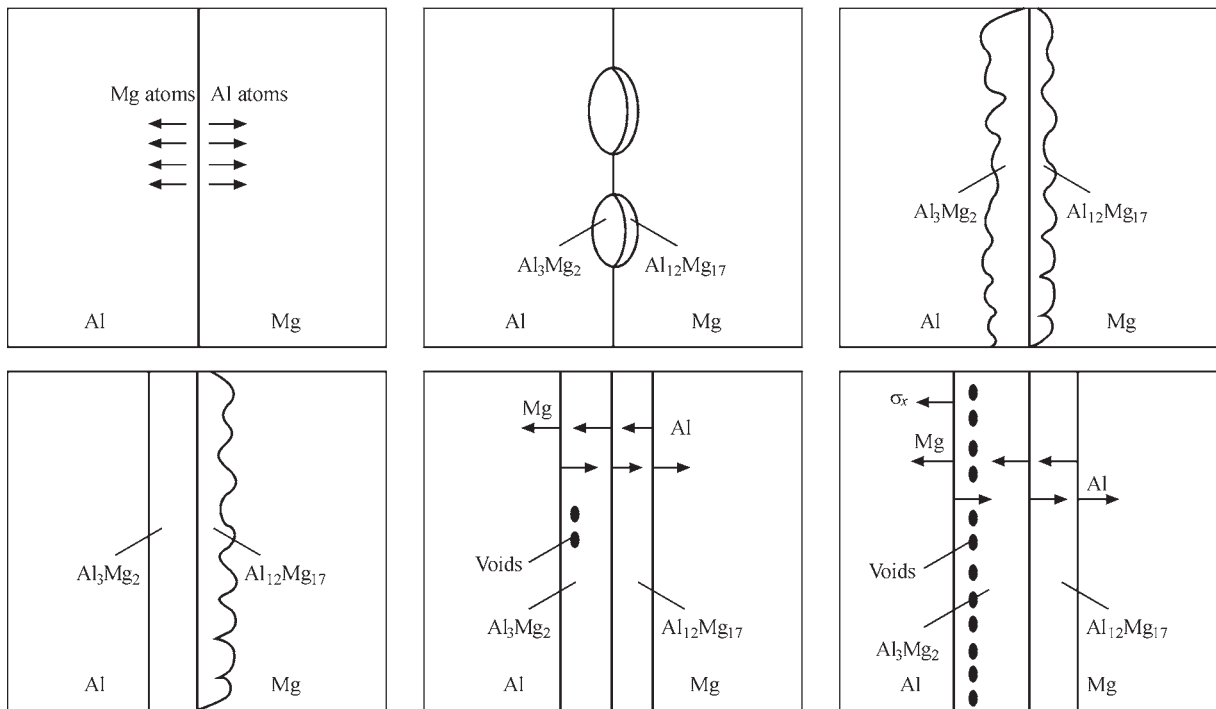


Рис. 2. Схематичне зображення змін мікроструктури на границі розділу Al–Mg [18]

симальну міцність на зріз отримали при 375 °C ( $\tau \approx 28$  МПа). За нижчих температур з'єднання відсутнє, а за вищих – відбувається надмірна деформація зразків, що супроводжується активним ростом шарів інтерметалідних фаз  $Mg_2Al_3$  і  $Mg_{17}Al_{12}$  і, як наслідок, падінням міцності.

Вплив товщини мідної фольги (200, 350, 500 мкм) на формування з'єднання з чистих алюмінію та магнію наведено в [20]. Зварювання проводили за температури 480 °C, тиску 15 МПа, витримки 20 ... 90 хв, вакууму  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. При безпосередньому зварюванні магнію з алюмінієм у стик формується широка дифузійна зона (до 58 мкм), яка складається з інтерметалідних сполук з підвищеною мікротвердістю (184 проти 63 *HV* для алюмінію і 28 *HV* для магнію) і низькою міцністю на зріз ( $\tau = 6 \dots 8$  МПа). Використання проміжного прошарку з міді дозволяє підвищити якість з'єднань. Найкращі результати були отримані з фольгою завтовшки 200 мкм і витримкою 90 хв. При цьому з боку магнію формується дифузійна зона завтовшки 75 мкм, яка містить фази  $Cu_2Mg$  і  $Mg_2Cu$  та має мікротвердість 142 *HV*, а з боку алюмінію – вузький шар (37 мкм) фаз  $CuAl_2$ ,  $CuAl$  і  $Cu_4Al_3$  з мікротвердістю 121 *HV*. Даний підхід дозволяє підвищити міцність зварних з'єднань до  $\tau = 31,2$  МПа.

Як показали автори [21], використання тоншої мідної фольги (20 мкм) не призводить до підвищення механічних властивостей з'єднань. Дифузійне зварювання AZ31В з алюмінієвими сплавами 7075, 6061 і 5083 проводили на режи-

мі: температура 465...510 °C, тиск 0,4 МПа, витримка 30...45 хв, вакуум 0,3 Па. За результатами досліджень рекомендовано використовувати дуже вузький інтервал температур 475...480 °C, оскільки за менших значень з'єднання відсутнє, а за більших – відбувається надмірна деформація зразків. Незалежно від марки алюмінієвого сплаву, в усіх випадках формуються дифузійні зони з ідентичним фазовим складом і близькою товщиною. Так, біля магнію утворюється шар із суміші  $Cu_2Mg$ ,  $CuMg_2$  і Al–Mg–Cu, а біля алюмінію –  $CuAl_2$ ,  $Cu_9Al_4$  і Al–Mg–Cu. Максимальна міцність на зріз ( $\tau = 25,51 \dots 31,03$  МПа) досягається за умов  $T = 480$  °C,  $P = 0,4$  МПа,  $t = 45$  хв. Відмінності в отриманих значеннях пояснюються різницею властивостей вихідних алюмінієвих сплавів.

Можливість використання фольги зі срібла завтовшки 60 мкм при дифузійному зварюванні чистих Mg і Al розглянуто в [22]. Параметри процесу задавали наступні: температура 430 °C, тиск 5 МПа, витримка 10...120 хв, вакуум  $10^{-4} \dots 10^{-3}$  Па. У зоні з'єднання формуються три шари інтерметалідів ( $Ag_2Al$ ,  $Mg_3Ag$  і  $MgAg$ ), товщина яких росте лінійно зі збільшенням тривалості зварювання, внаслідок чого відбувається підвищення мікротвердості в стик, найбільше значення якої сягає 287,5 *HV* для  $Mg_3Ag$  при  $t = 120$  хв (проти ~175 *HV* при  $t = 10$  хв). Збільшення вмісту крихких фаз також негативно впливає на міцність на зріз таких з'єднань, яка при  $t = 10$  хв становить  $\tau = 10,5$  МПа, а при  $t = 120$  хв – лише  $\tau = 4,6$  МПа.

У [23] був проведений порівняльний аналіз ефективності використання проміжного прошарку зі срібла у вигляді фольги ( $\delta = 30$  мкм) і напиленого покриття (завтовшки по  $\sim 4$  мкм на кожену поверхню, що зварювалась) при зварюванні сплавів AZ31 і 5083. Напилення проводилось в умовах вакууму  $10^{-3}$  Па, за робочої температури  $80$  °C і тривалості нанесення  $240$  хв. Режим дифузійного зварювання був наступний:  $T = 470$  °C,  $P = 1$  МПа,  $t = 60$  хв, вакуум  $6 \cdot 10^{-3}$  Па. В обох випадках у стику формується зона з'єднання, яка, починаючи від AZ31, складається з наступних шарів: твердий розчин Mg/суміш фаз  $Mg_3Ag$  і  $MgAg/Ag$ /твердий розчин  $Al/Ag_2Al$ . Показано, що покриття Ag забезпечило вужчу дифузійну зону ( $30$  мкм) та вищу міцність на зріз ( $\tau = 31,6$  МПа), тоді як фольга давала товстіший шар інтерметалідів ( $130$  мкм) і нижчі значення міцності ( $\tau = 21,9$  МПа).

Можливість використання в якості проміжного прошарку нікелю при дифузійному зварюванні чистих магнію і алюмінію досліджувалась у [24]. Зразки зварювали в аргоні за температури  $400 \dots 440$  °C, тиску  $1$  МПа, витримки  $30$  хв. Прошарок Ni завтовшки  $\sim 50$  мкм наносили на Al плазмовим напиленням. Покриття з нікелю продемонструвало ефективність у стримуванні небажаної дифузії між матеріалами, що з'єднувались. Якщо при безпосередньому зварюванні металів товщина інтерметалідних шарів  $Mg_{17}Al_{12}$  і  $Mg_2Al_3$  становила  $47 \dots 86$  мкм, то на границі Mg/Ni сформувався шар фази  $Mg_2Ni$  завтовшки менше ніж  $5$  мкм. Проте варто зазначити низькі механічні властивості усіх з'єднань, міцність на розтяг яких без прошарку становить  $\sigma_b = 2,1 \dots 3,6$  МПа, а з покриттям Ni –  $\sigma_b = 5,1 \dots 6,0$  МПа.

Можливість дифузійного зварювання через рідку фазу сплавів AZ31 з 5083 досліджували автори [25]. В якості проміжного прошарку використовували комбінацію з фольги олова та цинку завтовшки  $600$  і  $120$  мкм відповідно. Зварювання проводили в дві стадії: спочатку нагрівали до  $200$  °C, прикладали тиск  $4$  МПа і витримували протягом  $60$  хв для проходження евтектичної реакції між цинком і оловом, після чого підіймали температуру до  $333 \dots 339$  °C і витримували ще  $120$  хв. Вакуум у камері становив  $0,3$  Па. Під час термомеханічного циклу зварювання продукти евтектичної реакції Zn–Sn, а також розплавлене олово практично повністю витісняються зі стику. Запропонований підхід виявився дуже чутливим до найменшої зміни температури зварювання. Так, лише при кроці в  $3$  °C були отримані дифузійні зони зі значними відмінностями у фазовому складі окремих шарів:

- при  $T = 333$  °C – це AZ31/Zn/ $\alpha + \eta$ /Al(Zn)/5083,
- при  $T = 336$  °C – AZ31/Mg(Zn)/MgZn<sub>2</sub>/Mg<sub>2</sub>Zn<sub>11</sub>/Zn/ $\alpha + \eta$ /Al(Zn)/5083,
- при  $T = 339$  °C – AZ31/Mg(Zn)/ $\alpha$ -Mg + Mg<sub>7</sub>Zn<sub>3</sub> +  $\tau$ /твердий розчин Mg–Al–Zn/5083.

Максимальна мікротвердість у стику також стрімко змінюється залежно від температури та наявних фаз: так, при  $T = 333$  °C вона становить  $175$  HV у шарі суміші фаз  $\alpha + \eta$ , при  $T = 336$  °C її значення зростає до  $538$  HV на границі Mg/Zn, що пов'язано з утворенням Mg<sub>2</sub>Zn<sub>11</sub>, при  $T = 339$  °C відбувається деяке падіння до  $450$  HV в області  $\alpha$ -Mg + Mg<sub>7</sub>Zn<sub>3</sub> +  $\tau$ . Найвищу міцність на зріз  $\tau = 76,8$  МПа мали зразки, отримані при  $T = 339$  °C.

Продовжуючи тему використання проміжних прошарків, що плавляться в процесі зварювання, автори [26] використовували фольгу з цинку завтовшки  $50$  мкм при ДЗ сплавів AZ31B і 6061. Зварювання проводили в аргоні за температури  $380 \dots 580$  °C, тиску  $1$  кПа, тривалості процесу  $30$  хв. Тиск прикладали циклічно з інтервалом у  $10$  хв. Максимальна міцність при триточковому згині досягається при  $T = 420$  °C і становить  $\sigma_f = 22,977$  МПа. За цих умов на границі 6061/Zn утворюється твердий розчин цинку, а на границі AZ31B/Zn формується фаза Лавеса типу C14. Подальше підвищення температури зварювання спричиняє інтенсивну взаємодію проміжного прошарку з основним металом, що призводить до значного росту вмісту бінарних фаз Al–Mg ( $\beta$  і  $\gamma$ ), Mg–Zn (MgZn<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Zn<sub>11</sub>), а також потрійних фаз Al–Mg–Zn (фази Лавеса типу C14,  $\phi$  і  $\tau$ ), у результаті чого відбувається зниження механічних властивостей таких з'єднань.

У [27] в якості проміжного прошарку було використане оцинковане покриття на алюмінієвому сплаві 7075, який зварювали з магнієвим сплавом AZ80. Процес проводили на режимі: температура  $350 \dots 450$  °C, тиск  $2 \dots 25$  МПа, тривалість витримки  $5 \dots 150$  хв. Товщина цинкового покриття не вказана, але вона виявилась недостатньою для блокування утворення крихких інтерметалідів системи Al–Mg (Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> та Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>), довкола яких формуються пори, що в підсумку призводить до крихкого руйнування зразків. Оптимальними умовами зварювання визначено  $T = 375$  °C,  $P = 20$  МПа,  $t = 15$  хв, за яких досягнуто максимальну міцність на зріз  $\tau = 30$  МПа.

З урахуванням вищенаведеного можна зробити висновок, що використання проміжних прошарків є перспективним підходом для запобігання утворенню небажаних фаз у стику. Для ефективного

Параметри дифузійного зварювання магнієвих сплавів з алюмінієвими

| Матеріал        | Прошарок       | Параметри зварювання |        |          | Міцність з'єднання, МПа            | Вакуум, Па / захисне середовище      | Джерело |
|-----------------|----------------|----------------------|--------|----------|------------------------------------|--------------------------------------|---------|
|                 |                | T, °C                | P, МПа | t, хв    |                                    |                                      |         |
| AZ31 + 5083     | –              | 420                  | 1      | 60       | –                                  | 6·10 <sup>3</sup>                    | [7]     |
| AZ80 + AA7075   | –              | 400                  | 10     | 15       | τ = 26                             | –                                    | [8]     |
| AZ31 + 6061     | –              | 440                  | 29     | 60       | τ = 42                             | 1,33·10 <sup>2</sup>                 | [9]     |
| AZ31B + AA6061  | –              | 425                  | 20     | 40       | τ = 42                             | 3,87·10 <sup>3</sup>                 | [10]    |
| AZ31B + 7075    | –              | 430                  | 29     | 60       | τ = 24                             | 0,133                                | [11]    |
| AZ31B + 7075    | –              | 402                  | 29     | 60       | τ = 30                             | 0,133                                | [12]    |
| AZ31 + 7075     | –              | 470                  | 10     | 60       | τ = 38,41 <sup>1</sup>             | 18                                   | [13]    |
| 6061-O + AZ31-O | –              | 440                  | 29     | 90       | τ = 32 <sup>1</sup>                | 1,33·10 <sup>2</sup>                 | [14]    |
| AZ31 + 6061     | –              | 440                  | –      | –        | σ <sub>n</sub> = 45 <sup>2</sup>   | Аргон                                | [15]    |
| AZ91 + 6061     | –              | 440                  | –      | 60       | σ <sub>n</sub> = 80,3 <sup>2</sup> | Аргон                                | [16]    |
| AZ31 + 7075     | –              | 440                  | 25     | 60       | τ = 38                             | 13,3                                 | [17]    |
| AZ80 + 7075     | Покриття з Al  | 375                  | 10     | 15       | τ ≈ 28                             | –                                    | [19]    |
| Mg + Al         | Фольга з Cu    | 480                  | 15     | 90       | τ = 31,2                           | 1,33·10 <sup>2</sup>                 | [20]    |
| AZ31B + 7075    | Фольга з Cu    | 480                  | 0,4    | 45       | τ = 31,03                          | 0,3                                  | [21]    |
| Mg1 + 1060      | Фольга з Ag    | 430                  | 5      | 10       | τ = 10,5                           | 10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-3</sup> | [22]    |
| AZ31 + 5083     | Покриття з Ag  | 470                  | 1      | 60       | τ = 31,6                           | 6·10 <sup>-3</sup>                   | [23]    |
| Mg + Al         | Покриття з Ni  | 420                  | 1      | 30       | σ <sub>n</sub> = 3,6               | Аргон                                | [24]    |
| AZ31 + 5083     | Фольги Sn + Zn | 200 + 339            | 4      | 60 + 120 | τ = 76,8                           | 0,3                                  | [25]    |
| AZ31B + 6061    | Фольга з Zn    | 420                  | 0,001  | 30       | σ <sub>r</sub> = 22,977            | Аргон                                | [26]    |
| AZ80 + 7075     | Покриття з Zn  | 375                  | 20     | 15       | τ = 30                             | –                                    | [27]    |

<sup>1</sup>Значення міцності з'єднань, отриманих після попереднього відпалу зразків.

<sup>2</sup>Значення міцності після термообробки з'єднань.

запобігання утворенню крихких інтерметалідів важливе значення має як матеріал бар'єрного прошарку, так і його товщина.

**Висновки**

Із наведених матеріалів можна зробити висновок, що температура, тиск і тривалість процесу зварювання, а також наявність проміжного прошарку суттєво впливають на формування інтерметалідних фаз у стику, а також механічні властивості з'єднань із магнієвих та алюмінієвих сплавів.

Для з'єднань без використання проміжних прошарків значення міцності мають значний розкид без чіткої закономірності впливу параметрів зварювання на механічні властивості з'єднань. Оптимізація параметрів процесу має виконуватись індивідуально під задану пару сплавів.

Застосування проміжних прошарків спрямовано на запобігання утворенню крихких інтерметалідних фаз системи Al–Mg, а також на інтенсифікацію утворення фізичного контакту та активацію поверхонь, що з'єднуються.

Найвищу міцність на зріз 76,8 МПа отримано при застосуванні комбінованого прошарку Sn + Zn, який за температури 339 °C, тиску 4 МПа та витримки 180 хв дозволяє отримати якісне з'єднання. Головною складністю використання даного процесу є висока чутливість до коливань температури зварювання (відхилення в межах 3...6 °C призводять до значної зміни фазового складу зони

з'єднання), а також неможливість контролю обсягу рідкої фази в стику.

Прошарки з Cu, Zn дають стабільні результати зі значеннями міцності, які знаходяться на рівні, близькому до з'єднань, отриманих без проміжних прошарків.

Прошарки з Ag та Ni продемонстрували низьку ефективність при зварюванні практично чистих магнію з алюмінієм, що, вірогідно, пов'язано із загальмованим характером взаємодії між цими матеріалами. При цьому варто зазначити, що при зварюванні пари сплавів AZ31 + 5083 використання срібного покриття дозволяє отримати міцність на зріз на рівні з'єднань без прошарків.

Таким чином, дифузійне зварювання магнієвого сплаву з алюмінієвим залишається складною проблемою, яка потребує подальшого дослідження.

**Список літератури/References**

1. Edgar, R.L. (2000) Global overview on demand and applications for magnesium alloys. In Ed. by K.U. Kainer. *Magnesium Alloys and their Applications*, 4th ed., 3–8. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527607552.ch1>
2. Kainer, K.U., von Buch, F. (2003) The current state of technology and potential for further development of magnesium applications. Ed. by K.U. Kainer. *Magnesium Alloys and Technology*, 1–22. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527602046.ch1>
3. Czerwinski, F. (2014) *Magnesium Alloys: Properties in Solid and Liquid States*. AvE4EvA.
4. Chakradhar, R.P.S, Chandra Mouli, G., Barshilia, H., Srivastava, M. (2021) Improved corrosion protection of magnesium alloys AZ31B and AZ91 by cold-sprayed aluminum

- coatings. *J. of Thermal Spray Technology*, **30**, 371–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01128-0>
5. Liu, L., Ren, D., Liu, F. (2021) A review of dissimilar welding techniques for magnesium alloys to aluminum alloys. *Materials*, **7**(5), 3735–3757. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma7053735>
  6. Cai, W., Daehn, G., Vivek, A., Li, J., Khan, H., Mishra, R.S., Komarasamy, M. (2019) A state-of-the-art review on solid-state metal joining. *J. of Manufacturing Science and Engineering*, **141**, 031012. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4041182>
  7. Mofid, M.A., Loryaei, E. (2020) Effect of bonding temperature on microstructure and intermetallic compound formation of diffusion bonded magnesium/aluminum joints. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **4**, 413–421. DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201900080>
  8. Golden Renjith Nimal, R.J., Sivakumar, M., Arungalai Vendan, S., Esakkimuthu, G. (2018) Effect of mechanical and metallurgical analysis of magnesium and aluminium alloys using diffusion bonding. Ed. by K. Antony K., J. Davim. *Advanced manufacturing and materials science. Lecture notes on multidisciplinary industrial engineering*. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0_40)
  9. Jafarian, M., Rizi, M.S., Jafarian, M., Zare, H., Javadinejad, H.R. (2018) A comprehensive study of diffusion bonding of Mg AZ31 to Al 5754, Al 6061 and Al 7039 alloys. *Transact. of the Indian Institute of Metals*, **12**, 3011–3020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1402-0>
  10. Joseph Fernandus, M., Senthilkumar, T., Balasubramanian, V. (2011) Developing Temperature–Time and Pressure–Time diagrams for diffusion bonding AZ80 magnesium and AA6061 aluminium alloys. *Materials & Design*, **3**, 1651–1656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.011>
  11. Azizi, A., Alimardan, H. (2016) Effect of welding temperature and duration on properties of 7075 Al to AZ31B Mg diffusion bonded joint. *Transact. of Nonferrous Metals Society of China*, **26**, 85–92. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64091-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64091-8)
  12. Manafi, S., Azizi, A. (2021) Experimental and numerical evaluation of diffusion welding of 7075 aluminum and AZ31 magnesium alloys. *Advanced Ceramics Progress*, **1**, 25–34. DOI: <https://doi.org/10.30501/acp.2021.257290.1051>
  13. Chen, Z.T., Lin, F., Li, J., Wang, F., Meng, Q.S. (2014) Diffusion bonding between AZ31 magnesium alloy and 7075 aluminum alloy. *Applied Mechanics and Materials*, **618**, 150–153. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.618.150>
  14. Jafarian, M., Rizi, M.S., Jafarian, M., Honarmand, M., Javadinejad, H.R., Ghaheri, A., Bahramipour, M.T., Ebrahimi-an, M. (2016) Effect of thermal tempering on microstructure and mechanical properties of Mg-AZ31/Al-6061 diffusion bonding. *Materials Science and Engineering: A*, **666**, 372–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.011>
  15. Ding, Y., Ju, D. (2019) Microstructure and properties of diffusion bonded Mg/Al joints. *Key Engineering Materials*, **804**, 29–34. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.804.29>
  16. Ding, Y., Zhang, S., Wu, B., Hao, J., Chen, Y., Ju, D. (2021) Sequential process of diffusion bonding and annealing on dissimilar welding of Mg/Al alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6691422. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6691422>
  17. Afghahi, S.S.S., Jafarian, M., Paidar, M., Jafarian, M. (2016) Diffusion bonding of Al 7075 and Mg AZ31 alloys: Process parameters, microstructural analysis and mechanical properties. *Transact. of Nonferrous Metals Society of China*, **7**, 1843–1851. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64295-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64295-4)
  18. Long, L., Peng, Y., Sun, B., Liu, W. (2020) Study on the interfacial bonding mechanism of Al/Mg gradient material. *Materials Research Express*, **7**, 016542. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6536>
  19. Golden Renjith Nimal, R.J., Sivakumar, M., Gokul Raj, S., Arungalai Vendan, S., Esakkimuthu, G. (2018) Microstructural, mechanical and metallurgical analysis of Al interlayer coating on Mg-Al alloy using diffusion bonding. *Materials Today: Proceedings*, **5**(2), 5886–5890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.187>
  20. Javad Varmazyar, Mohammad Khodaei (2019) Diffusion bonding of aluminum-magnesium using cold rolled copper interlayer. *J. of Alloys and Compounds*, **773**, 838–843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.320>
  21. Nadermanesh, N., Azizi, A., Manafi, S. (2021) Mechanical and microstructure property evaluation of diffusion bonding of 5083, 6061 and 7075 aluminium to AZ31 magnesium using Cu interlayer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt B: J. of Engineering Manufacture*, **13**, 2118–2131. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544054211014489>
  22. Wang, Y., Luo, Q., Shen, Q., Wang, C., Zhang, L. (2014) Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded Mg1/Pure Ag Foil/1060Al joints. *Key Engineering Materials*, **616**, 280–285. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.616.280>
  23. Shakeri, H., Mofid, M.A. (2021) Physical vapor deposition assisted diffusion bonding of Al alloy to Mg alloy using silver interlayer. *Metals and Materials International*, **27**, 4132–4141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00731-8>
  24. Yin, F., Liu, C., Zhang, Y., Qin, Y., Liu, N. (2018) Effect of Ni interlayer on characteristics of diffusion bonded Mg/Al joints. *Materials Science and Technology*, **34**, 1104–1111. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1424382>
  25. Tianbao Tan, Yangyang Guo, Gang Chen, Zijun Rong, Houhong Pan (2024) Influence of bonding temperature on microstructure and mechanical properties of AZ31/Zn/Sn/5083 diffusion joint. *Materials*, **17**, 6110. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17246110>
  26. Liu, C., Zhu, Y., Ma, Y., Gao, Z., Ye, D., Li, Q. (2025) Study on the interfacial microstructure and fracture mechanism of Al/Mg composites with Zn interlayer by cyclic hot pressing. *J. of Alloys and Compounds*, **1010**, 177650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177650>
  27. Golden Renjith Nimal, R.J., Chenthil, M., Sangamaeswaran, R., Hariharan, R., Esakkimuthu, G. (2021) An investigation on microstructural evolution and mechanical properties of Zn coating as interlayer on Mg-Al alloys using diffusion bonding. *Materials Today: Proceedings*, **46**(9), 3512–3516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.985>

## JOINING ALUMINUM AND MAGNESIUM ALLOYS BY DIFFUSION WELDING (REVIEW)

L.V. Petrushynets<sup>1</sup>, V.E. Fedorchuk<sup>1</sup>, Yu.V. Falchenko<sup>1</sup>, O.O. Novomlynets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [moremia2@ukr.net](mailto:moremia2@ukr.net)

<sup>2</sup>National University «Chernihiv Polytechnic». 95 Shevchenko Str., 14030, Chernihiv, Ukraine. E-mail: [rector@stu.cn.ua](mailto:rector@stu.cn.ua)

Magnesium alloys, due to their low density and high specific strength, are promising materials for mechanical engineering, the automotive industry, and portable electronics. However, their wider application is limited by low strength and thermal stability, as well as a high susceptibility to corrosion. The widespread use of magnesium alloys often requires reliable bonding with other materials, primarily aluminum alloys. However, obtaining such bonds is technologically challenging due to the significant difference in the physicochemical properties of these two materials, which leads to the formation of brittle phases and degradation of mechanical properties. This paper considers the potential of utilizing various technological approaches to

joining the aluminum and magnesium alloys by diffusion welding. It has been demonstrated that welding magnesium alloys to aluminum without interlayers leads to significant scatter in joint strength values, which is caused by considerable differences in the welding parameters (temperature, pressure, and process duration) used by paper authors. The use of interlayers such as Cu, Zn, Ag, Ni, and Sn + Zn significantly affects the microstructure, phase composition, and mechanical properties of the joints, which is associated with the varying tendency of these metals to form intermetallic phases at the interface. The highest shear strength of 76.8 MPa was obtained when using Sn + Zn interlayer. However, this technological process is highly sensitive to fluctuations in the welding temperature, which is due to changes in the amount of liquid phase formed between magnesium and aluminum and, consequently, in the phase composition of the joint zone. Thus, it can be concluded that diffusion welding of magnesium alloys to aluminum remains a challenging problem that requires further investigation. 27 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

*Keywords: diffusion welding, magnesium alloy, aluminum alloy, interlayer, microstructure, strength*

**ORCID**

Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>, Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Новомлинець О.О. – <https://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

**КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

**АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ**

Л.В. Петрушинець

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [moremia2@ukr.net](mailto:moremia2@ukr.net)

**РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ**

Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, Ю.В. Фальченко, О.О. Новомлинець (2026) З'єднання алюмінієвих і магнієвих сплавів дифузійним зварюванням (Огляд). *Автоматичне зварювання*, **03**, 11–19. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.03.02>

**ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ**

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 14.10.2025

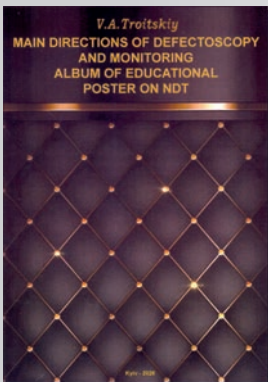
Отримано у переглянутому вигляді 12.12.2025

Підписано до друку 14.05.2026

Оприлюднено 20.05.2026

**NEW BOOK**

**REVIEW**



The work «*Main Direction of Defectoscopy and Monitoring. Album of Educational Posters on NDT*» by Prof. Volodymyr Troitsky addresses a subject significant both for the scientific community and for various industrial sectors. As the title itself suggests, the work is devoted to the key directions in non-destructive testing (NDT) and structural health monitoring, areas that remain critical for ensuring safety, reliability, and efficiency across different fields of engineering, particularly welded structures and pipelines deployed in energy, transportation, and manufacturing sectors.

In this publication, the author draws upon many years of his personal experience as well as the collective expertise of his colleagues, with whom he has collaborated over decades. The first part offers a concise overview of the evolution of NDT research and technologies developed by the Institute's researchers at E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (PWI), many of which have gained national and international recognition.

The second part of the work focuses on the practical application of these technologies, illustrating how scientific advancements translate into real-world solutions. Through carefully selected case studies and applied examples, the author demonstrates the successful integration of scientific research into industrial practice. This structure – linking foundational research with real-world application – underscores the work's practical and educational value.

A valuable feature of the publication is the Album of Educational Posters on NDT, which provides a rich set of visual aids and serves as a didactic and illustrative tool. These materials enhance the educational value of the work and make complex technical concepts more accessible to students, engineers, and practitioners in the field.

The field of non-destructive testing is multidisciplinary and internationally oriented. Its development has been greatly facilitated by the activities of professional organizations such as the International Committee for Non-Destructive Testing (ICNDT), the European Federation for Non-Destructive Testing (EFNDT), and various national societies including the Ukrainian Society for NDT and Technical Diagnostics (USNDT). These institutions play an indispensable role in promoting scientific exchange, harmonizing standards, organizing training and certification programs, and supporting the dissemination of research findings.

This work stands as a significant contribution to the academic literature on non-destructive testing and monitoring. It is a valuable resource for scholars, engineers, and technical specialists engaged in ensuring the integrity and reliability of critical infrastructure.

*Prof. Igor Krivtsun, director of PWI*