

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИЙОМИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ (Огляд)

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець

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

На підставі результатів літературного аналізу показана перспективність використання методів зварювання тиском: дифузійного, ультразвукового, прокаткою при з'єднанні елементів зі сплавів магнію. Проведено порівняльну оцінку режимів зварювання. Визначено основні напрями для отримання бездефектних з'єднань. Показано, що основними шляхами удосконалення процесів зварювання є застосування наступних підходів: контроль температурно-часових параметрів зварювання, використання проміжних прошарків у вигляді окремих шарів з однорідних матеріалів на основі міді, нікелю, цинку або срібла, або евтектичних сумішей, зміцнення стику за рахунок використання нано- або дрібнодисперсних часток; інтенсифікація пластичної деформації за рахунок накладення ультразвукових коливань; збільшення інтенсивності пластичної деформації, а також застосування термічної обробки до і після зварювання. Бібліогр. 31, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: магнієві сплави, зварні з'єднання, мікроструктура, міцність, дифузійне зварювання, ультразвукове зварювання, зварювання прокаткою

Вступ. Магній – один з найбільш поширених елементів на Землі. За оцінками загальної кількості він на четвертому місці після заліза, кисню і кремнію та посідає восьме місце за вмістом у земній корі. Головною перевагою застосування магнієвих сплавів є їх низька вага: магній має одну з найменших щільностей серед конструкційних матеріалів [1]. Його активне застосування гальмується через низькі пластичність і формуючість при кімнатній температурі, наявність базової текстури, розтріскування кромок при прокатці, високу електрохімічну активність [2].

Розробка нових сплавів і впровадження сучасних методів обробки сприяє поширенню магнію в автомобільній і авіаційній промисловості. В останні роки магнієві сплави стали ширше застосовуватись у виробництві великими автомобільними компаніями, включаючи General Motors, Ford, Volkswagen і Toyota. З цієї групи матеріалів виготовляють елементи приладової панелі, коробки передач, компоненти рульового управління та опори радіатора. З магнієвих сплавів вже виготовляються такі елементи літака як кронштейни, верхній корпус компресора для установки кондиціонування повітря, кріплення дверей, крильчатка зі скрученими лопатями, опора антени, віконна рама, частини коробки передач турбовентиляторного двигуна та інше [1, 2].

Оскільки магній набуває все ширшого застосування у виготовленні різноманітних вузлів, існує потреба в розробці методів з'єднання, які б забезпечили відповідні властивості отриманих елементів конструкцій.

Однак відомо, що традиційні технології зварювання магнієвих сплавів плавленням спричиняють значне розміщення матеріалів у зоні з'єднання,

формування литої великокристалічної структури швів та утворення характерних дефектів у вигляді пор, мікрочлукочень оксидних плівок і тріщин, обумовлених розплавленням і кристалізацією металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання [3, 4].

Ефективними способами підвищення надійності швів може бути застосування способів зварювання в твердій фазі, що унеможливує утворення дефектів, характерних для способів зварювання плавленням.

З урахуванням вище наведеного, метою цієї роботи було провести аналіз технологічних прийомів, які застосовуються при зварюванні тиском магнієвих сплавів. До них можна віднести прокатування, дифузійне та ультразвукове зварювання та їх комбінації.

На рис. 1 приведено основні технологічні прийоми, які використовуються при зварюванні про-



Рис. 1. Основні методи зварювання тиском магнієвих сплавів

катуванням, ультразвуковому та дифузійному. Зварювання тертям з перемішуванням в цій статті не розглядається в силу специфічних особливостей його впливу на зону з'єднання, які суттєво відрізняють його від вище зазначених процесів.

Розглянемо публікації останніх років, присвячені даному питанню [5–31].

Дифузійне зварювання. При дифузійному зварюванні (ДЗ) основними параметрами є температура, тиск та час витримки. В роботах [5–8] досліджували вплив розміру зерна та параметрів зварювання при нагріванні зразків на повітрі на формування структури та механічні властивості з'єднань.

В роботі [5] при дослідженні з'єднання чистого магнію варіювали параметри: температуру 300...400 °С, тиск 2 ... 20 МПа, час витримки 15...4320 хв. Максимальні значення міцності на зсув 95,7...109,4 МПа (88,8 % від міцності основного матеріалу) були досягнуті на режимі: $T = 400$ °С, $P = 20$ МПа, $t = 60$ хв. Лінія з'єднання в таких зразках за допомогою оптичної мікроскопії не ідентифікується. Відмічається, що середній розмір зерна у магнієвому сплаві у вихідному стані становив близько 85 мкм.

При зварюванні сплаву AZ31 (Mg–3Al–1Zn, мас. %) [6] проводили його попередній відпал при 400 °С протягом 30 хв. Середній розмір зерна після даної операції становив 16,8 мкм. Дифузійне зварювання проводили на повітрі при температурі 400 °С, тиску 2...10 МПа, витримці 30...400 хв. При цьому в сплаві спостерігається надпластичність.

Як показали проведені авторами дослідження, збільшення часу зварювання зразків з магнієвого сплаву AZ31 призводить до збільшення розміру зерна (рис. 2).

Під час зварювання між контактуючими поверхнями утворюються пори, для заліковування яких необхідно використовувати більший тиск або тривалість зварювання. Максимальні значення міцності на зсув 74,2...80,5 МПа (85 % від вихідного металу) були отримані на режимі: $T = 400$ °С, $P = 3$ МПа, $t = 180$ хв. Лінія з'єднання в таких

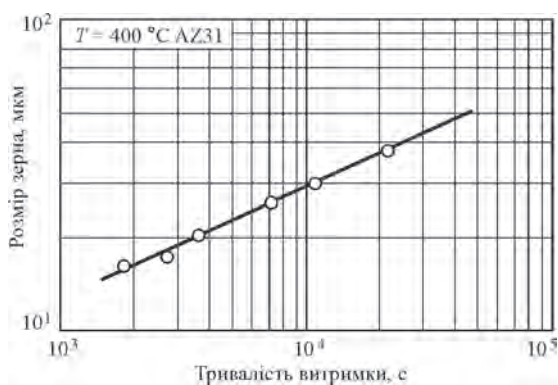


Рис. 2. Зв'язок між розміром зерна і часом нагрівання зразків при температурі 400 °С [6]

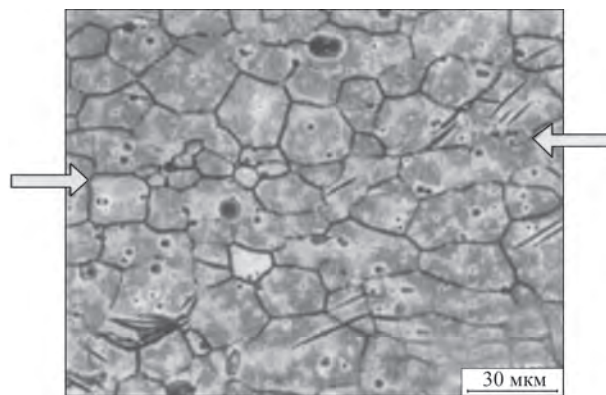


Рис. 3. Оптична мікροструктура зони з'єднання зразків, отриманих під тиском 3 МПа протягом 180 хв [6]

зразках за допомогою оптичної мікроскопії не виявляється (рис. 3).

В роботі [7] продовжили дослідження на сплаві AZ31 (Mg–3Al–1Zn, мас. %) при проявленні в ньому надпластичної поведінки та зниженні температури зварювання до 200...300 °С. Використовували матеріал після гарячого пресування та прокатки. Середній розмір зерна становив 8,5 мкм. Авторами зазначається, що розмір зерна вихідного сплаву суттєво впливає на температуру, за якої проявляються надпластичні властивості, наприклад, для розміру зерна 16 мкм вона складає 300 °С, а для 8,5 мкм – 200 °С. Тож температуру та тиск зварювання обирали такими, щоб за них проявлялись надпластичні властивості сплаву, відповідно 250...300 °С і 15...30 МПа. Процес проводили на повітрі, його тривалість становила 60...120 хв.

За температури зварювання 250 °С в стикі спостерігається чітка лінія контакту та пори. Підвищення температури дозволяє знизити дефектність зони з'єднання, проте збільшення тривалості витримки до 120 хв призводить до надмірного росту зерна і, як наслідок, зниження міцності отриманих з'єднань. Максимальна міцність на зсув $\tau = 68,5$ МПа (80,3 % від міцності вихідного матеріалу) була досягнута на режимі: $T = 300$ °С, $P = 20$ МПа, $t = 60$ хв.

В публікації [8] розглядався вплив розміру зерна на формування з'єднань з магнієвого сплаву AZ31 в умовах дифузійного зварювання. Використовували зразки після відпалу при 400 °С протягом 30 хв з середніми розмірами зерен 28 та 11 мкм. Дифузійне зварювання проводили на повітрі при температурі 400 °С, тиску 2...10 МПа, витримці 30...600 хв.

Було показано, що розмір зерна вихідного металу суттєво впливає на процес формування з'єднань і його укрупнення вимагає застосування більш жорсткого контролю режимів зварювання для отримання міцних з'єднань. Це пояснюється залежністю надпластичної поведінки металу від розміру зерна. Так, у випадку зразків з середнім

розміром зерна 28 мкм, оптимальним режимом є: $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 5\text{ МПа}$, $t = 180\text{ хв}$, а для розміру зерна 11 мкм – $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 3\text{ МПа}$, $t = 120\text{ хв}$. Міцність на зсув при цьому складає відповідно 74,5...81,1 МПа (90 % від вихідного металу) і 81,4 ... 85,1 МПа (92 %). Авторами запропонована модель утворення з'єднання, яка включає як дифузійні процеси, так і пластичну деформацію приповерхневих шарів. Надано рекомендації з вибору тривалості зварювання при різних значеннях тиску в залежності від розміру зерна основного металу.

В роботах [9–11] досліджували дифузійне зварювання магнієвих сплавів в умовах вакууму.

В роботі [9] проводили дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) екструдованого магнієвого сплаву AZ31 (Mg–2,5–3,5Al–0,5–1,5Zn–0,2–0,5Mn – до 0,1Si – до 0,05Cu – до 0,005Fe – до 0,005Ni, мас. %). З метою отримання вихідного матеріалу з заданим середнім розміром зерна 14,1 мкм проводили попередній ізотермічний відпал при $300\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 30 хв. Параметри процесу зварювання задавали в наступних діапазонах: температура 390...480 $^\circ\text{C}$, тиск 8 МПа, тривалість витримки 60...120 хв, ступінь розрядження в камері 14 Па.

Результати досліджень показали, що температура зварювання та тривалість витримки мали ключовий вплив на якість з'єднань. При температурі нижчій за 420 $^\circ\text{C}$ дифузійні процеси в стику ідуть загальмовано, чітко проглядається лінія контакту, міцність на зріз таких зразків низька. При $T = 450\text{...}480\text{ }^\circ\text{C}$ відбувається часткове зникнення лінії контакту, суттєвий ріст зерна та падіння міцності. При часі витримки 90 хв дифузійні процеси проходять найбільш повно, міцність зразків зростає, подальше збільшення тривалості зварювання призводить до невеликого падіння міцності через укрупнення зерна. Оптимальним режимом був визначений наступний: температура 420 $^\circ\text{C}$, тиск 8 МПа, витримка 90 хв. За даних умов було отримано зразки з максимальним значенням міцності на зсув $\tau = 76,2\text{ МПа}$.

Автори роботи [10] досліджували особливості утворення з'єднань при ДЗВ магнієвого сплаву ZK60 (Mg–6Zn–0,35Zr, мас. %). Середній розмір зерна становив 11,9 мкм. Зварювання проводили при температурі 300...400 $^\circ\text{C}$, тиску 1...20 МПа, витримці 30...90 хв, вакуумі 0,27 Па. На основі проведених механічних досліджень зразків оптимальним режимом зварювання був визначений наступний: температура 380 $^\circ\text{C}$, тиск 20 МПа, витримка 90 хв. Міцність на зсув таких з'єднань становить 65,8 МПа (82 % від міцності основного металу). За менших значень параметрів режиму в стику проглядається лінія контакту і окремі пори. Перевищення рекомендованих значень при-

зводить до надмірного росту зерна і, як наслідок, деякого падіння міцності. В процесі зварювання на оптимальному режимі відбувається ріст середнього розміру зерна з 11,9 до 21,2 мкм. До певних меж цей процес позитивно впливає на якість зразків, оскільки основним механізмом формування з'єднання є дифузія атомів і ковзання вихідних меж зерен, викликане зростанням зерна.

В роботі [11] проводили дифузійне зварювання у вакуумі магнієвого сплаву AZ61 (Mg–5,8–7,2Al–0,4–1,5Zn–0,1–0,4Mn – до 0,3Si – до 0,05Cu – до 0,05Fe – до 0,05Ni, мас. %). Попередній рекристалізаційний відпал при 300 $^\circ\text{C}$ протягом 30 хв дозволив зменшити середній розмір зерна з 20,48 до 14,29 мкм. ДЗВ проводили при температурі 430...490 $^\circ\text{C}$, тиску 10 МПа, тривалості витримки 60...120 хв. Ступінь розрядження не наводиться.

Металографічні дослідження зразків, отриманих на запропонованих режимах, показали, що в усіх випадках залишається виразна лінія контакту, проте її товщина зменшується зі збільшенням температури зварювання та тиску. В той же час застосування більшої температури зварювання призводить до надлишкового росту зерна і, як наслідок, падіння механічних властивостей з'єднань. За результатами експериментів було встановлено, що максимальну міцність на зсув 51,95 МПа (46,78 % від міцності основного матеріалу) можна отримати на режимі: $T = 470\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 90\text{ хв}$. Мікротвердість таких зразків в зоні з'єднання має вищі значення, ніж в основному металі ($HV\ 82,48$ проти $\sim HV\ 65$), що пояснюється пластичною деформацією приповерхневих шарів в процесі зварювання.

В роботі [12] для підвищення міцності отриманих з'єднань запропоновано проводити їх термічну обробку. Автори досліджували дифузійне зварювання у вакуумі сплаву AZ91 (Mg–9Al–1Zn, мас. %). З метою подрібнення зерна проводили рекристалізаційний відпал при 300 $^\circ\text{C}$ протягом 30 хв. Середній розмір зерна становив 12,31 мкм. Зразки зварювали у вакуумі 18 Па на режимі: температура 430...490 $^\circ\text{C}$, тиск 10 МПа, тривалість витримки 60...120 хв. Після зварювання на запропонованих режимах в усіх зразках чітко проглядається лінія контакту, а також значний ріст зерна при поєднанні високої температури з тривалою витримкою. Максимальна міцність на зсув з'єднань після зварювання становила 64,7 МПа, відповідно, оптимальним режимом був визначений наступний: $T = 470\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $t = 90\text{ хв}$. З метою підвищення механічних властивостей з'єднань проводили їх відпал. Термічну обробку проводили при 320...380 $^\circ\text{C}$ протягом 60...300 хв. На всіх режимах було отримано збільшення міцності на зсув, максимальні значен-

ня $\tau = 76,93$ МПа були отримані при температурі 350°C і витримці 240 хв. Лінія з'єднання при цьому практично зникає, зерна в стику дрібнозернисті, проте їх розмір поступово збільшується у міру віддалення від шва.

З наведених вище робіт [5–12] по зварюванню магнієвих сплавів без використання проміжних прошарків можна зробити висновок, що бажано застосовувати режими зварювання, які не призводять до значного росту зерна. Додаткова термообробка, за рахунок протікання рекристалізаційних процесів, дозволяє дещо підвищити міцність з'єднань.

В роботах [13–24] досліджували можливість використання при дифузійному зварюванні проміжних прошарків різного хімічного складу.

В роботі [13] для ДЗВ магнієвого сплаву AZ31B ($\text{Mg}-2,5-3,5\text{Al}-0,5-1,5\text{Zn}-0,2-0,5\text{Mn}-0,1\text{Si}-0,05\text{Cu}-0,005\text{Fe}$, мас. %) в якості проміжного прошарку була запропонована мідна фольга товщиною 50 мкм. Зварювання проводили при температурі 480°C , тиску 10 МПа, витримці 30 хв, вакуумі 10^{-2} Па.

Було отримано бездефектні з'єднання, в мікроструктурі яких спостерігається формування трьох шарів (рис. 4). Загальна товщина дифузійної зони становить 115 мкм. Центральний шар світло-сірого кольору з чорними вкрапленнями товщиною 35 мкм є сумішшю фаз Mg_2Cu (ділянка D), MgCu_2 (ділянка C) і твердого розчину $\text{Mg}(\text{Cu})$ (ділянка B). Шари, що прилягають до магнієвого сплаву (товщиною по 40 мкм) являють собою темно-сіру основу з білими переважно видовженими вкрапленнями (ділянка A) та складаються з твердого розчину $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Cu})$ і розподіленій в ньому фазі $\text{Mg}_{17}(\text{Cu}, \text{Al})_{12}$. Атоми міді виявляють доволі високу активність у сплаві AZ31B. На границі розділу Mg/Cu мідь дифундує вздовж границь зерен в основний метал, формуючи білу сполуку. Утворення з'єднання розглядається як результат дифузії по границях зерен і дислокаціях, а також твердофазних перетворень. Розподіл мікротвердості в зоні

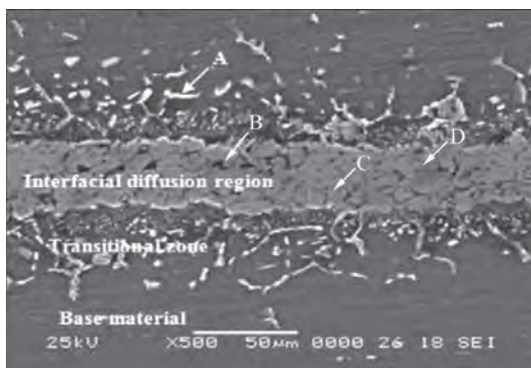


Рис. 4. Мікроструктура зони з'єднання сплаву AZ31B з використанням прошарку з Cu, де A, B, C та D – різні ділянки дифузійної зони [13]

з'єднання має ступінчастий характер і поступово збільшується від магнієвого сплаву до центрального шару стику, де становить близько $HV 100$, що на $HV 50 \dots 60$ вище, ніж у основного матеріалу.

Автори роботи [14] для зварювання сплаву $\text{Mg}-3\text{Al}-1\text{Zn}$, мас. % застосовували більш тонкий прошарок з міді товщиною $\delta = 20$ мкм. Зварювання проводили в атмосфері аргону при температурі 530°C , тиску 0,7 МПа, витримці $5 \dots 120$ хв.

Процес формування з'єднання автори розділяють на чотири етапи: пластична деформація та дифузія в твердому стані; розчинення прошарку та основного металу; ізотермічне затвердіння; гомогенізація (рис. 5, a–в). На першому етапі ($t = 5$ хв) відбувається зближення контактуючих поверхонь і їх мікропластична деформація. На другому ($t = 5 \dots 15$ хв) – утворення рідкої фази внаслідок евтектичної реакції, що супроводжується розчиненням прошарку та частини основного металу. Зона з'єднання при цьому складається з твердого розчину магнію та евтектики CuMg_2 . На стадії ізотермічного затвердіння ($t = 15 \dots 60$ хв) відбувається поступове зменшення вмісту фази CuMg_2 внаслідок інтенсивної дифузії міді в основний метал, що супроводжується ростом зерна та появою чіткої лінії з'єднання в центрі стику. На четвертому етапі закінчується процес гомогенізації зони з'єднання, яка переважно являє собою твердий розчин магнію з розподіленою по границях зерен фазою CuMg_2 . Лінія з'єднання втрачає чіткі обриси. Результати експериментів показали, що міцність з'єднань на зсув напряму залежить від тривалості зварювання (рис. 5, д). При малому часі зварювання ($5 \dots 30$ хв) механічні властивості з'єднань знаходяться на низькому рівні внаслідок того, що в стику залишається забагато крихкої фази CuMg_2 , а при задовгому часі зварювання ($30 \dots 120$ хв) – через інтенсивний ріст зерна в поєднанні зі скупченням фази CuMg_2 на границях зерен. Оптимальним режимом був визначений наступний: $T = 530^\circ\text{C}$, $P = 0,7$ МПа, $t = 30$ хв (рис. 5). Міцність з'єднань на зсув в даному випадку становить 70,2 МПа (85,2 % від міцності основного металу).

В роботі [15] зварювання магнієвого сплаву AZ31 виконували через прошарок міді та міді з оловом. На поверхню зразків методом вакуумного випаровування наносили мідь товщиною 5 мкм. В частині експериментів додатково була використана фольга з олова товщиною 50 мкм. Зварювання проводили в аргоні при температурі 520°C і тиску 0,5 МПа, варіюючи витримку в діапазоні $10 \dots 50$ хв. Нагрів до температури зварювання тривав близько 2 хв, охолодження до кімнатної температури відбувалось разом з камерою.

Показано, що при використанні покриття з міді в стику формується дифузійна зона товщиною

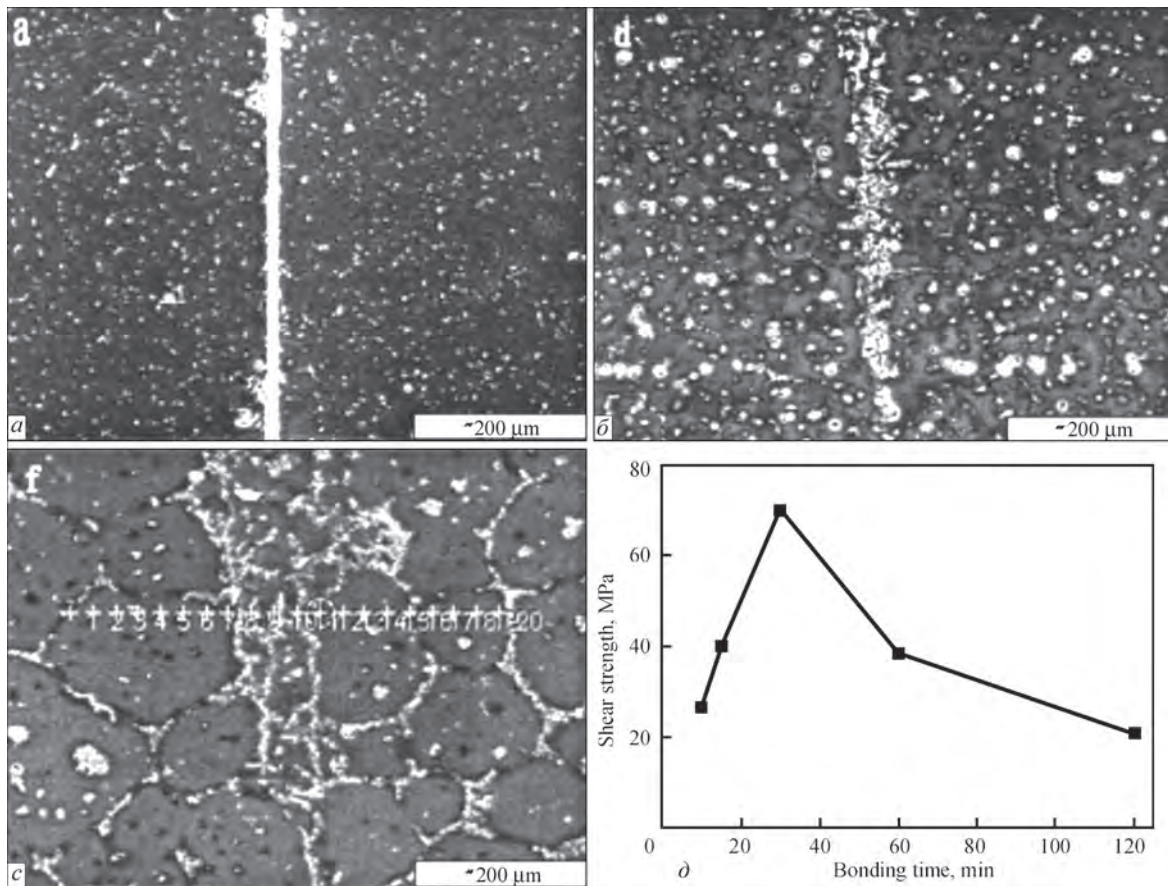


Рис. 5. Мікроструктура з'єднань, отриманих при 530 °С при часі зварювання 5 хв (а), 30 (б), 120 (в) та графік залежності міцності на зсув від часу зварювання (д) [14]

50...70 мкм, розмір якої зменшується зі збільшенням часу витримки. Вона складається з твердого розчину Mg і фази Cu_2Mg , наявні дефекти у вигляді пор. Використання комбінованого прошарку з покриття Cu і фольги Sn дозволяє отримати бездефектне з'єднання з більш однорідним характером розподілу елементів в стику та вищим значенням міцності на зсув. Область з'єднання складається з твердого розчину, збагаченого Mg, і окремих включень фази Cu_2Mg . Шар Sn не приймає участі в утворенні інтерметалідних фаз і вільно дифундує вглиб магнієвого сплаву. Значення мікротвердості в стику близькі до основного металу (68...70 VHN проти ~58 VHN). Міцність з'єднань на зсув росте зі збільшенням тривалості витримки, проте після 30 хв майже не змінюється ($\tau = 64$ МПа при $t = 30$ хв і $\tau = 67$ МПа при $t = 50$ хв).

Автори роботи [16] при зварюванні магнієвого сплаву AZ31 (Mg-2,5-3,5Al-0,7-1,3Zn-0,3Si-0,2Mn-0,05Cu-0,005Fe-0,005Ni, мас. %) використовували в якості проміжного прошарку чисту мідь, а також поєднання міді з наночастинками: TiO_2 , Al_2O_3 або SiC. Після очищення на поверхні зразків наносили гальванічне покриття з чистої міді товщиною 20 мкм. Для додаткового осадження наночастинок їх додавали в розчин електроліту в кількості 10 г/л. Було використано наночастинки TiO_2 і SiC розміром 20 нм, а Al_2O_3 – 20 і

50 нм. Зварювання проводили в атмосфері аргону при температурі 525 °С, тиску 1 МПа, витримці 60...120 хв.

Показано, що збільшення часу зварювання в усіх випадках сприяє повнішому проходженню процесу ізотермічного твердіння та дозволяє отримати більш однорідне з'єднання. При використанні покриття з чистої міді в зоні з'єднання залишається суцільний прошарок фази AlCuMg, вздовж якого спостерігаються мікротріщини. При застосуванні прошарку міді з частинками SiC в центральній частині стику формується значний об'єм фази Mg_2Cu , наявність якої є причиною крихкого руйнування таких зразків. На прикладі прошарку міді з Al_2O_3 показано, що збільшення розміру наночастинок з 20 до 50 нм призводить до падіння значень міцності. В зоні з'єднання при цьому формується суміш фаз Mg_2Cu , AlCuMg і інтерметалідних фаз системи Al-Cu-Mg, збагачених магнієм, спостерігаються окремі мікротріщини. Найвищу міцність на зсув 31,66 МПа (98 % від основного металу) мали зразки, зварені через прошарок міді з TiO_2 на режимі: $T = 525$ °С, $P = 1$ МПа, $t = 120$ хв. В зоні з'єднання спостерігаються скупчення частинок фази AlCuMg (рис. 6). Рівномірний розподіл наночастинок у проміжному шарі в даному випадку пригнічує зародження і поширення тріщин.

Автори роботи [17] в якості проміжного прошарку для зварювання магнієвого сплаву AZ31 ($\text{Mg}-2,54\text{Al}-0,71\text{Zn}-0,09\text{Si}-0,03\text{Mn}-0,03\text{Cr}-0,03\text{V}-0,01\text{Ti}$ мас. %) використовували алюмінієву фольгу товщиною 9 і 14 мкм. Зварювання проводили при температурі 440...450 °С, тиску 2 МПа, витримці 45...120 хв, вакуум 2,7 Па.

Зона з'єднання складається з трьох шарів, при цьому вміст алюмінію поступово зменшується від центру стику до основного металу. За рівних інших умов з'єднання, отримані через фольгу товщиною 9 мкм, мають вищу міцність, що пояснюється більш повним проходженням процесу ізотермічного твердіння та утворенням меншого обсягу сполуки $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$. При тривалості зварювання більше 75 хв відбувається інтенсивний ріст зерна, що призводить до падіння міцності. Мікротвердість зони з'єднання до трьох разів вища ніж в основному металі, при цьому збільшення товщини фольги дещо підвищує твердість стику. Оптимальними умовами для формування з'єднань були визначені наступні: $T = 440$ °С, $P = 2$ МПа, $t = 75$ хв, товщина проміжного шару 9 мкм. Міцність на зсув при цьому становить ~ 35 МПа.

Автори роботи [18] при дифузійному зварюванні у вакуумі магнієвого сплаву AZ91 ($\text{Mg}-9\text{Al}-1\text{Zn}$, мас. %) розглядали можливість використання в якості проміжного прошарку фольги зі срібла товщиною 100 мкм. Зварювання проводили при температурі 480 °С, тиску 1 МПа, витримці 30...120 хв, у вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па.

Були отримані бездефектні з'єднання. В процесі зварювання відбувається плавлення матеріалу на границі сплав AZ91/фольга Ag і активна дифузія атомів між основним матеріалом і прошарком, при цьому срібло поступово розчиняється в матриці магнієвого сплаву. Міцність на зсув з'єднань майже не залежить від тривалості зварювання і знаходиться в межах 65...70 МПа (проти ~ 120 МПа для основного металу в стані після відпалу). Мікроструктура та хімічний склад зони

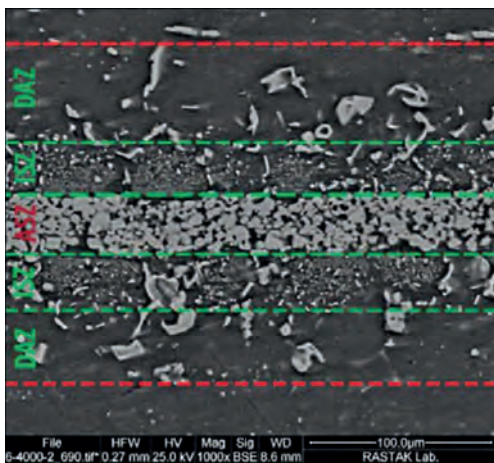


Рис. 6. Мікроструктура з'єднання сплаву AZ31 з використанням прошарку з міді з наночастинками TiO_2 [16]

з'єднання зразків, отриманих за різної витримки, подібні між собою.

В роботі [19] зварювання магнієвого сплаву AZ31 ($\text{Mg}-2,99\text{Al}-0,96\text{Zn}$, мас. %) проводили через проміжний прошарок зі срібла товщиною 50 мкм. Зварювання проводили при температурі 480...500 °С і витримці 60 хв.

В зразках, отриманих при $T = 480...490$ °С, в центральній частині шва спостерігається евтектичний шар і дифузійні шари на границі з основним металом. При зварюванні на 500 °С в зоні з'єднання виявляється тільки тонкий евтектичний шар. З ростом температури також змінюється склад виявлених фаз. При 480 °С в стику утворюється суміш з інтерметаліду AgMg_4 і евтектики AgMg_3 загальною шириною 40 мкм. При 490 °С формується зона з'єднання шириною близько 100 мкм, дифузійні шари якої складаються переважно з твердого розчину, збагаченого Mg, а центральна ділянка – з евтектики AgMg_3 . При 500 °С проміжний прошарок з Ag майже зникає внаслідок дифузії в основний метал, залишаючи тонкий евтектичний шар (~ 6 мкм). Зазначається, що підвищення температури зварювання також позитивно впливає на мікротвердість зони з'єднання, її значення падає зі $HV0,05 = 170$ ($T = 480$ °С) до $HV0,05 = 80$ ($T = 500$ °С). Міцність на зсув за оптимальної температури зварювання при цьому становить лише 39 МПа, що вдвічі нижче ніж у основного металу.

Автори роботи [20] використовували проміжний прошарок з нікелю при ДЗВ магнієвого сплаву AZ31 ($\text{Mg}-3\text{Al}-1\text{Zn}$, мас. %). Процес зварювання проводили на режимі: температура 515 °С, тиск 0,16 МПа, витримка 5...120 хв, вакуум 0,053 Па.

Після зварювання в зоні з'єднання можна виокремити 3 дифузійні шари, які розміщені симетрично відносно центру стику. Центральний шар, який складається з евтектики, поступово зменшується і зникає зі збільшенням часу витримки до 60 хв, що свідчить про повне ізотермічне за твердіння шва. Безпосередньо до нього прилягають інтерметалідні шари, товщина яких росте зі збільшенням тривалості зварювання. Шари, що граничать з основним металом, при витримці в інтервалі 20...30 хв спершу ширшають, а далі зменшуються в розмірі. Це пояснюється поступовою гомогенізацією зони з'єднання, оскільки відбувається взаємна дифузія елементів прошарку і основного металу. Збільшення часу зварювання до 120 хв призводить до падіння міцності, що було пов'язано з утворенням та сегрегацією крихких інтерметалідів системи Mg–Ni. Оптимальним режимом був визначений наступний: $T = 515$ °С, $P = 0,16$ МПа, $t = 60$ хв. За цих умов були отримані з'єднання з максимальною міцністю на зсув 36 МПа, мікротвердість при цьому становить

ла 179 VHN, що втричі більше ніж в магнієвому сплаві (55 VHN).

В роботі [21] здійснювали зварювання магнієвого сплаву AZ31 (Mg–3Al–1Zn, мас. %) через покриття з нікелю. Нікель товщиною 5 мкм наносили методом вакуумного випаровування. Зварювання проводили на режимі: температура 520 °С, тиск 8 МПа, витримка 5...60 хв, вакуум $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

В перші хвилини формування з'єднання в стику ще спостерігаються ділянки, збагачені нікелем. Збільшення тривалості зварювання до 30 хв сприяє дифузії Ni і повнішому проходженню процесу ізотермічного твердіння. Максимальні значення міцності на зсув $\tau = 46,2$ МПа були отримані при витримці 20 хв. При більшій тривалості процесу в стику поруч з формуванням крихкої фази Mg_2Ni спостерігається інтенсивний ріст зерна, що призводить до падіння міцності таких з'єднань.

Автори роботи [22] розглядали можливість використання частинок SiC в якості армуючого елемента стику при дифузійному зварюванні у вакуумі магнієвого сплаву AZ91 (Mg–8,25Al–0,63Zn–0,22Mn–0,035Si–0,014Fe–0,003Cu–0,002Be мас. %). Зварювання проводили при температурі 420 °С, тиску 10 МПа, з витримкою протягом 60 хв. Між поверхнями магнієвого сплаву укладали частинки SiC розміром 10...45 мкм у співвідношенні 2...6 %.

Показано, що використання армуючих частинок дозволяє майже вдвічі підвищити міцність на зсув у порівнянні зі зварюванням без прошарків (109 МПа проти 63 МПа). Оптимальними розміром і концентрацією визначено відповідно 10...25 мкм і 4 %. Завеликий обсяг часточок призводить до сповільнення дифузійних процесів і скупчення SiC в певних ділянках стику, що призводить до зниження пластичності таких з'єднань та їх руйнування при нижчих значеннях міцності.

З наведеного вище випливає, що при зварюванні через евтектичні прошарки необхідно контролювати процес утворення крихких фаз за рахунок зменшення тривалості зварювання, а також обмеженого формування рідкої фази, що досягається шляхом використання більш тонких фольг/покриттів. Використання армуючих частинок оптимального розміру та концентрації може суттєво підвищити міцність отриманих з'єднань.

В роботах [23, 24] досліджували вплив пластичної деформації на формування зварних з'єднань.

В роботі [23] зварювання магнієвого сплаву AZ31 (Mg–3,04Al–0,99Zn–0,29Mn–0,02Si–0,01Fe–0,01Cu, мас. %) виконували в дві стадії: гаряче формування і відпал. Стиснення виконували при температурі 350 °С, швидкості деформації $0,1 \text{ c}^{-1}$, ступені деформації 10...60 %. Зразки нагрівали до

заданої температури і стискали до заданої осадки, залишаючи під тиском ще 3 хв. Далі їх запаювали у вакуумні трубки, витримували при 400 °С протягом 60...720 хв.

Збільшення ступеня деформації до 40...60 % сприяє проходженню динамічної рекристалізації зерен в стику, початкова лінія зчеплення набирає хвилеподібних обрисів. Ріст нових зерен на межі розділу та їх поступове розростання в сусідні області деформації призводить до міграції меж зерен і часткового зникнення границі розділу (рис. 7).

Відпал протягом 60 хв призводить до деякого росту рекристалізованих зерен. Збільшення часу витримки до 120...240 хв сприяє утворенню більш розгалуженого контуру границь зерен, при цьому їх розмір збільшується неістотно. Після витримки протягом 480 хв границя розділу повністю зникла. Подальше збільшення тривалості відпалу призводить до небажаного огрубіння зерна, що негативно впливає на механічні властивості таких з'єднань. Максимальну міцність на розтяг 164,7 МПа мали зразки, які були з'єднані зі ступенем осадження 60 % і відпалені протягом 480 хв, що на 9 % більше, ніж у зразків, витриманих протягом 60 хв.

Автори роботи [24] досліджували особливості формування з'єднань з магнієвого сплаву WE43 (Mg–4Y–3Nd–0,5Zr, мас. %). Зразки нагрівали до 450...525 °С та стискали, задаючи швидкість деформації $0,001...1 \text{ c}^{-1}$ і ступінь деформації 5...50 %. Після нагрівання до заданої температури їх стискали та загартовували у воді.

В зоні з'єднання в умовах низької швидкості деформації $0,001 \text{ c}^{-1}$ та високої температури зварювання 525 °С відбувається стрімкий динамічний ріст зерен, що призводить до зниження міцності ($\sigma_b = 114,43$ МПа). У разі проведення процесу при температурі 450 °С або високій швидкості деформації, подрібнення зерна в зоні з'єднання контролюється за допомогою динамічної рекристалізації. Показано, що проведення зварювання при високій швидкості деформації 1 c^{-1} призводить до значного падіння пластичності у порівнянні з вихідним сплавом (3,56...5,51 % проти 12,17 %). Найвищі значення міцності на розрив 158,60 МПа були отримані для зразків, з'єднаних при температурі 450 °С і швидкості деформації $0,001 \text{ c}^{-1}$, пластичність при цьому становила 6,99 %.

Ультразвукове зварювання. В роботах з ультразвукового зварювання магнієвих сплавів [25–28] наряду з використанням параметрів, характерних для дифузійного зварювання (температура нагрівання, тиск) додатково застосовують коливання, що дозволяє суттєво зменшити час зварювання.

В роботі [25] проводили зварювання магнієвого сплаву ME20M ($Mg-1,3-2,2Mn-0,15-0,35Ce-0,3Zn$, мас. %) через прошарок чистого Zn товщиною 50 мкм. Зразки зі сплаву ME20M зварювали в індукторі на повітрі при температурі 370 °С, тиску 0,15 МПа, при витримці до 2 хв. В якості додаткового джерела інтенсифікації утворення з'єднання було використано ультразвук потужністю 200 Вт на частоті 20 кГц.

Отримати з'єднання на запропонованому режимі без ультразвукових коливань не вдалось. Застосування ультразвуку сприяє руйнуванню оксидної плівки на контактних поверхнях, пришвидшує проходження евтектичної реакції, інтенсифікує дифузію Mg і Zn в евтектичній рідині та прискорює процес ізотермічного затвердіння. Вже через секунду дії ультразвуку прошарок цинку перетворюється на двофазний сірий шар, основна частина якого складається з $Mg_{51}Zn_{20}$ з голчастими вкрапленнями MgZn. Зі збільшенням тривалості зварювання (рис. 8) відбувається поступове зменшення товщини центрального евтектичного шару та його зникання внаслідок завершення процесу ізотермічного затвердіння з формуванням твердого розчину Mg(Zn) з окреми-

ми вкрапленнями фази MgZn. Найвища середня міцність з'єднань на зсув 106,4 МПа була отримана для зразків, тривалість зварювання яких становила 2 хв.

В публікації [26] в якості проміжного прошарку використано фольгу сплаву H62 ($Cu-38Zn$) товщиною 20 мкм. Зварювання проводили при температурі 460 °С, тиску 0,15 МПа, тривалості процесу 0,05...1,5 хв, частоті ультразвуку 20 кГц, потужності 500 Вт.

Показано, що збільшення тривалості зварювання сприяє поступовому розчиненню проміжного прошарку з утворенням фаз $CuMg_2$ та $CuMgZn$, які в свою чергу зникають внаслідок формування в стику твердого розчину. Процес ізотермічного затвердіння повністю завершується через 1,5 хв. Оксидні плівки при цьому дробляться, частково видавлюються зі стику з рідкою фазою, а їх залишки витягуються двома ланцюжками вздовж основного металу. Зразки, отримані при тривалості зварювання 1,5 хв, мали міцність на зсув на рівні основного металу (105 МПа).

Автори роботи [27] досліджували можливість використання ультразвуку при зварюванні магнієвого сплаву AZ31В. В якості проміжного про-

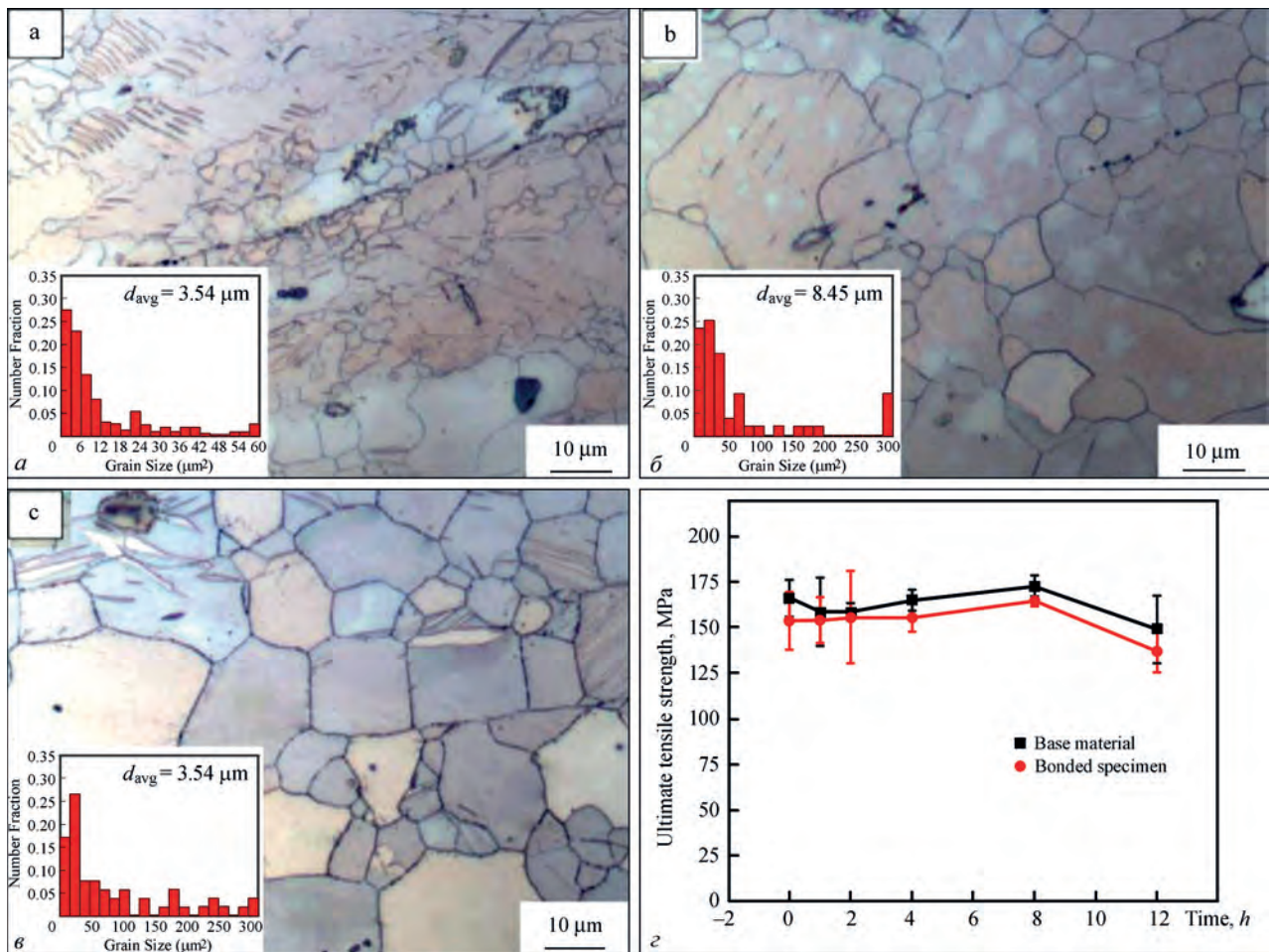


Рис. 7. Мікроструктура зони з'єднання та розподіл розмірів зерен в зразках, отриманих при температурі 350 °С, при ступені деформації 0,6 з наступною термообробкою при 400 °С протягом: а – 60; б – 240; в – 480 хв. Графік впливу тривалості термічної обробки на міцність зразків на зсув (г) [23]

шарку використовували фольгу Zn товщиною 0,5 мм. Частота коливань складала 20 кГц. Зварювання проводили на повітрі при температурі 360...380 °С, тиску 0,36 МПа, витримці 0,02 хв.

Було показано, що при температурі зварювання 360...370 °С в центрі стику формуються шар інтерметаліду $MgZn_2$ з ланцюжком пор посередині, шари евтектики на границі контакту з основним металом і тонкі включення $MgZn$ на межі між $MgZn_2$ і евтектикою. При цьому збільшення температури сприяє зменшенню товщини центрального шару. При 380 °С цинкова фольга повністю реагує з магнієм, утворюючи евтектичну структуру з вкрапленнями твердого розчину на основі магнію. Максимальну міцність на зсув 42 МПа мали зразки, отримані при температурі 380 °С.

В роботі приведена схема утворення з'єднання через рідкий прошарок (рис. 9). Перед зварюванням на поверхнях магнієвого сплаву та Zn присутні щільні оксидні шари. Після нагрівання до температури зварювання і включення ультразвукових коливань оксиди починають руйнуватися, а на їх місці утворюється рідка фаза. Активна дифузія Mg і Zn сприяє швидкому утворенню великої кількості рідини, руйнуванню залишків оксидів і витисненню їх в грат. Атоми Mg дифундують у проміжок Zn, утворюючи $MgZn_2$ і $MgZn$ в твердому стані. На границі з основним металом рідка фаза утворює евтектичну структуру.

В роботі [28] досліджували вплив потужності імпульсів на якість з'єднань з магнієвого сплаву AZ31В. В якості проміжного прошарку використовували фольгу з цинку товщиною 0,5 мм. Зварювання проводили на повітрі при температурі 360 °С і тиску до 0,4 МПа. Робоча частота 20 кГц с потужністю 333...1000 Вт.

Дослідження показали, що вже через секунду дії ультразвуку оксид з поверхні магнієвого сплаву повністю видаляється. В стику формується широка зона з'єднання (~1,2 мм), яка складається з шару $MgZn_2$ з вкрапленнями Zn в центральній частині та евтектоїдних структур Mg/Zn на границі з основним металом, між обома шарами спостерігаються включення $MgZn$. Збільшення тривалості

зварювання сприяє зменшенню розміру центральної зони, від якої вже після 3 с залишаються окремі поздовжні вкраплення. В з'єднаннях, отриманих при вищій потужності ультразвуку, спостерігається менша залишкова пористість і більша ширина стику з товщими евтектоїдними шарами. При тиску сонотроду 0,4 МПа в стику формується зона з'єднання шириною 120 мкм, яка цілком складається з евтектоїдної фази. Дослідження механічних властивостей показали, що найвищу міцність на зсув 40 МПа мали з'єднання, які цілком складались з евтектоїдної структури.

Застосування ультразвуку при зварюванні магнієвих сплавів за рахунок інтенсифікації дифузійних процесів і стрімкого руйнування оксидної плівки на контактних поверхнях дозволяє в рази скоротити тривалість процесу утворення з'єднання у порівнянні з дифузійним зварюванням. Проте використання даного методу обмежується можливістю зварювання зразків малого розміру.

Зварювання прокатуванням. В роботах [29–31] по зварюванню прокатуванням ступінь деформації зразків була збільшена в значній мірі від 32 % [29] до 50 % [30, 31] на відміну від дифузійного зварювання, при якому ступінь деформації дорівнює 2...5 %.

Автори роботи [29] досліджували вплив температури процесу при накопичуваній прокатці сплаву AZ31. В якості вихідного металу були використані листи товщиною 1 мм, які складали в пакети по три і нагрівали в печі до 350...450 °С протягом 10 хв. Прокатку проводили з деформацією 32 % і швидкістю 14 м/хв.

Було показано, що при попередньому підігріві збірки зразків до 350 °С після прокатки на границі зерен починає відбуватись динамічна рекристалізація. При 400 °С починають формуватись смуги зсуву, які складалася з динамічних рекристалізованих зерен. При 450 °С утворюється смуга зсуву неправильної форми, ширина якої зменшується від поверхні всередину. Підвищення температури зразків перед прокаткою інтенсифікує динамічну рекристалізацію в стику та покращує якість з'єднання. При високій температурі межі зерен лег-

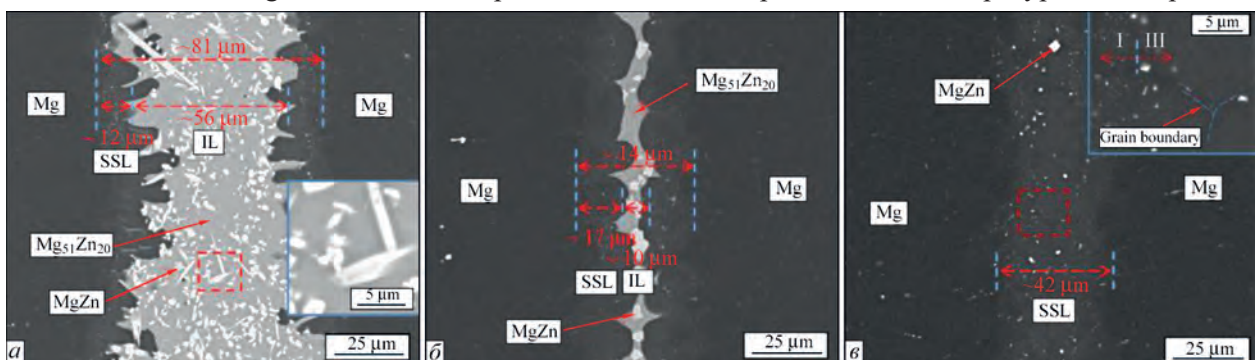


Рис. 8. Мікроструктура з'єднання сплаву ME20M з використанням прошарку з Zn та ультразвукових коливань при тривалості процесу: а – 0,02; б – 0,5; в – 2 хв [25]

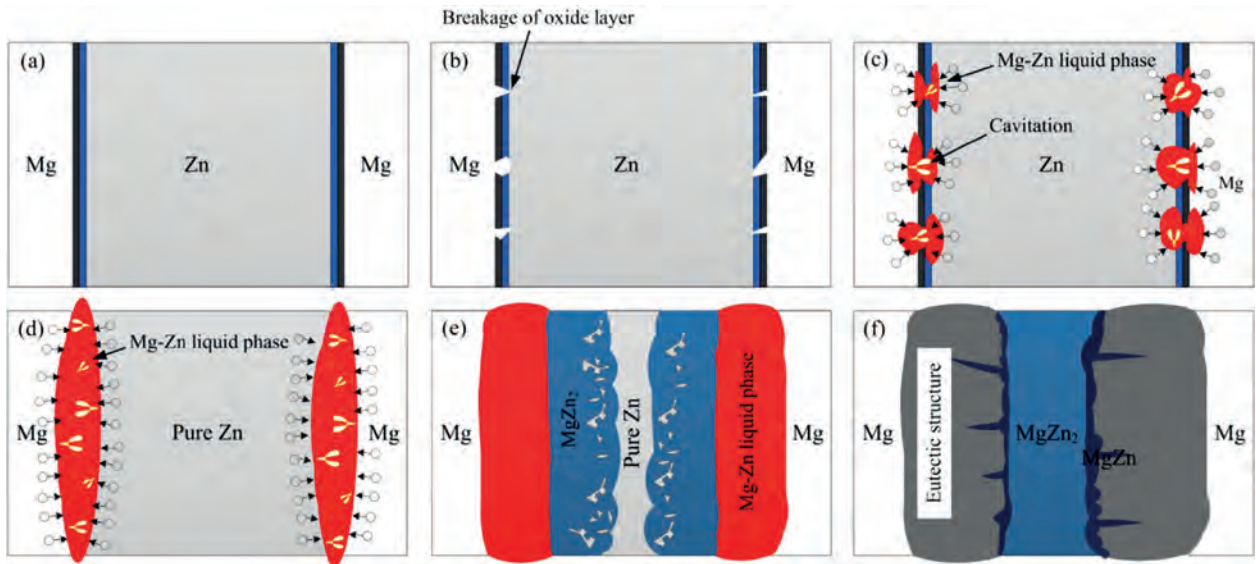


Рис. 9. Схематичне зображення механізму формування з'єднань через рідкий прошарок [27]

ко переміщуються, а рекристалізовані зерна контактують і зливаються. Схематично особливості формування з'єднання в залежності від температури попереднього підігріву наведено на рис. 10. Загалом процес прокатки значно знижує значення подовження матеріалу і майже не змінює межу плинності і міцність на розрив. Суттєве зниження пластичності пояснюється утворенням тріщин під час прокатки. Оптимальною температурою попереднього підігріву була 450 °С. За неї межа плинності становила 222,8 МПа, межа міцності 295,4 МПа, а подовження 6,0 %.

В роботі [30] магнієвий сплав LZ91 (Mg–9Li–1Zn) піддавали накопичуваній прокатці. Пластини довжиною 100 мм і товщиною 0,65 мм з одного боку очищали, складали в пакет по дві, нагрівали до 150 або 400 °С на повітрі та прокатували зі ступенем деформації 50 % при температурі роликів 135 °С. Далі, отримані таким чином двошарові листи знову складали в пакет по два і повторювали процес до 5 разів.

У вихідному стані в сплаві LZ91 виявляється витягнута волокниста структура, що складається з двох основних фаз α і β . Прокатування пакетів сприяє подрібненню зерна та утворенню більш однорідної структури. При температурі по-

переднього підігріву 400 °С та п'яти циклах прокатки волокниста мікроструктура багатой на Mg α -фази стає тоншою і переривчастою. Максимальні значення межі міцності 290,2 МПа мали зразки підігріті до 150 °С і прокатані п'ять разів. Використання більш високої температури попереднього підігріву призводить до деякого падіння значень твердості і міцності внаслідок проходження процесу відновлення та перекристалізації.

Автори роботи [31] вивчали деформаційну поведінку при накопичуваній прокатці магнієвого сплаву AZ31 (Mg–3,2Al–1,3Zn–0,4Mn–0,06Ce–0,03Fe–0,01Si, мас. %). Листи товщиною 2 мм складали в пакети по два та прокатували зі ступенем деформації 50 % і швидкістю 24 мм/хв. Попередній підігрів становив 350...400 °С.

Отримати з'єднання вдалося тільки при підігріві до 400 °С. Після першого проходу в стикі чітко проглядається лінія контакту з диспергованими частинками оксиду. Фаза Al_8Mn_5 досить рівномірно розподілена в основному металі та зоні з'єднання. На кромках утворюються тріщини. Після другого – якість зчеплення поліпшується, розшарування на межі розділу не спостерігалось. Прокатування суттєво впливає на розмір зерен: вже після першого проходу їх середній розмір падає на порядок зі

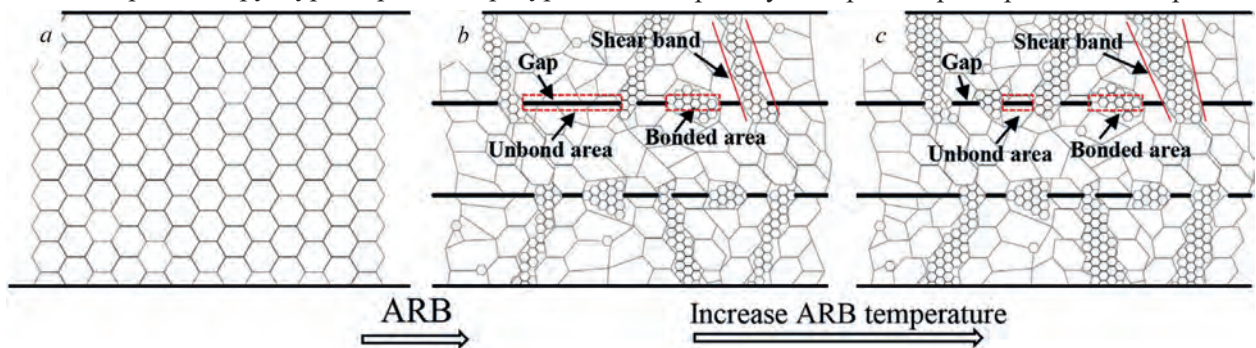


Рис. 10. Схематична ілюстрація еволюції мікроструктури та механізму утворення з'єднання зі сплаву AZ31 з різною температурою процесу [29]

Параметри зварювання тиском магнієвих сплавів

Матеріал	Спосіб зварювання	Прошарок	Параметри зварювання			Міцність з'єднання, МПа	Джерело
			$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$t, \text{хв}$		
Чистий Mg	ДЗ	–	400	20	60	$\tau = 95,7 \dots 109,4$	[5]
AZ31	ДЗ	–	400	3	180	$\tau = 74,2 \dots 80,5$	[6]
AZ31	ДЗ	–	300	20	60	$\tau = 68,5$	[7]
AZ31	ДЗ	–	400	5	180	$\tau = 74,5 \dots 81,1$	[8]
			400	3	120	$\tau = 81,4 \dots 85,1$	
AZ31	ДЗ	–	420	8	90	$\tau = 76,2$	[9]
ZK60	ДЗ	–	380	20	90	$\tau = 65,8$	[10]
AZ61	ДЗ	–	470	10	90	$\tau = 51,95$	[11]
AZ91	ДЗ	–	470	10	90	$\tau = 76,93^1$	[12]
AZ31B	ДЗ	Мідна фольга	480	10	30	–	[13]
Mg–3Al–1Zn	ДЗ	Фольга Cu	370	0,7	30	$\tau = 70,2$	[14]
AZ31	ДЗ	Покриття Cu + фольга Sn	520	0,5	50	$\tau = 67$	[15]
AZ31	ДЗ	Покриття Cu + наночастинки TiO ₂	525	1	120	$\tau = 31,66$	[16]
AZ31	ДЗ	Фольга Al	440	2	75	$\tau = 35$	[17]
AZ91	ДЗ	Фольга Ag	480	1	30...120	$\tau = 65 \dots 70$	[18]
AZ31	ДЗ	Фольга Ag	500	–	60	$\tau = 39$	[19]
AZ31	ДЗ	Ni	515	0,16	60	$\tau = 36$	[20]
AZ31	ДЗ	Покриття Ni	520	8	20	$\tau = 46,2$	[21]
AZ-91	ДЗ	Частинки SiC	420	10	60	$\tau = 109$	[22]
AZ31	ДЗ	–	350	– ³	3	$\sigma_b = 164,7^1$	[23]
WE43	ДЗ	–	450	– ³	–	$\sigma_b = 158,60$	[24]
ME20M	УЗЗ	Фольга Zn	370	0,15	2	$\tau = 106,4^2$	[25]
ME20M	УЗЗ	Фольга Cu–38Zn	460	0,15	1,5	$\tau = 105^2$	[26]
AZ31B	УЗЗ	Фольга Zn	380	0,36	0,02	$\tau = 42^2$	[27]
AZ31B	УЗЗ	Фольга Zn	360	0,4	–	$\tau = 40^2$	[28]
AZ31	ЗП	–	450	–	–	$\sigma_b = 295,4$	[29]
LZ91	ЗП	–	150	–	–	$\sigma_b = 290,2$	[30]
AZ31	ЗП	–	400	–	–	–	[31]

Примітки. ¹Значення міцності після термообробки з'єднань. ²Використання ультразвуку в якості додаткового джерела інтенсифікації процесу утворення з'єднання. ³Стиснення при зварюванні з заданим рівнем осадження.

100 до 10 мкм, а після другого до 7,6 мкм, при цьому великі зерна практично зникають. Подрібнення зерна відбувається за рахунок ротаційної динамічної рекристалізації. Підкреслюється, що навіть після одного проходу прокатки відбувається ріст значень меж плинності та міцності. Відзначається деяка неоднорідність механічних властивостей, що пов'язано зі сформованою в процесі прокатки текстурою: так, в напрямку прокатки вони дещо вищі, ніж впоперек неї. Дана анізотропія зменшується зі збільшенням кількості проходів. У той час як деформація зразків, вирізаних в напрямку прокатки, в основному здійснюється шляхом ковзання дислокацій, механічне подвійкування відіграє важливу роль під час деформації зразків, вирізаних поперек напрямку прокатки.

З результатів досліджень, представлених в роботах [29–31] при зварюванні прокатуванням, можна зробити висновок, що збільшення швидкості пластичної деформації призводить до суттєвого подрібнення зерна та підвищення міцності з'єднань внаслідок протікання процесів динамічної рекристалізації.

Виходячи з існуючих технологій з'єднання магнієвих сплавів (таблиця), можна зробити висновок, що при їх зварюванні не існує сталих підходів для отримання якісних з'єднань. Навіть для зварювання одноіменних сплавів пропонуються режими, що суттєво відрізняються один від іншого. Загалом, можна підсумувати, що процес бажано проводити при більш низьких температурах та/або тривалості зварювання, а також зважати на розмір зерна вихідного металу. Використання евтектичних проміжних прошарків дозволяє суттєво скоротити тривалість утворення з'єднання.

Висновки

Для одержання зварних з'єднань з магнієвих сплавів широко використовуються методи зварювання тиском. Основними шляхами удосконалення процесів зварювання є застосування наступних підходів:

- контроль температурно-часових параметрів зварювання, для унеможливлення росту зерна;
- використання проміжних прошарків у вигляді окремих шарів з однорідних матеріалів на основі міді, нікелю, цинку, алюмінію або срібла, або

евтектичних сумішей, що дозволяє за рахунок хімічної взаємодії компонентів пришвидшити руйнування оксидної плівки на поверхні зразків, що зварюються;

– зміцнення стику за рахунок використання нано- або дрібнодисперсних часток;

– інтенсифікація пластичної деформації за рахунок накладення ультразвукових коливань;

– збільшення інтенсивності пластичної деформації;

– застосування термічної обробки до та після зварювання.

Таким чином, при дифузійному зварюванні магнієвих сплавів перспективним можна вважати використання тонких прошарків або покриттів, що повинно зменшити хімічну неоднорідність в стику та сприяти активації контактних поверхонь. Зміцнення зони з'єднання за рахунок введення в стик, або утворення в процесі зварювання дрібнодисперсних часток. Збільшення швидкості та ступеня пластичної деформації.

Список літератури/References

1. Stefano Gialanella, Alessio Malandrucolo. (2020) *Aerospace Alloys*. Springer, Cham.
2. Colleen Bettles, Matthew Barnett. (2012) *Advances in wrought magnesium alloys. Fundamentals of processing, properties and applications*. Woodhead Publishing Limited.
3. 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
4. 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.
5. Hidetoshi Somekawa, Hiroyuki Hosokawa, Hiroyuki Watanabe, Kenji Higashi (2001) Experimental Study on Diffusion Bonding in Pure Magnesium. *Materials Transactions*, 42, 10, 2075–2079. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.2075>
6. Hidetoshi Somekawa, Hiroyuki Hosokawa, Hiroyuki Watanabe, Kenji Higashi (2003) Diffusion bonding in superplastic magnesium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 339, 328–333. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00127-2)
7. Hidetoshi Somekawa, Hiroyuki Watanabe, Toshiji Mukai, Kenji Higashi (2003) Low temperature diffusion bonding in a superplastic AZ31 magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 48, 1249–1254. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00054-X)
8. Hidetoshi Somekawa, Hiroyuki Watanabe, Kenji Higashi (2003) The Grain Size Dependence on Diffusion Bonding Behavior in Superplastic Mg Alloys. *Materials Transactions*, 44, 4, 496–503. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.496>
9. 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>
10. Yu Yandong, Li Qiang (2005) Diffusion Bonding in Superplastic ZK60 Magnesium Alloy. *Materials Science Forum*, 488–489, 227–230. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.227>
11. 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>
12. Fei Lin, YaXin Tian, ZhiTong Chen et al. (2015) Diffusion Bonding and Post-Weld Heat Treatment of Extruded AZ91 Magnesium Alloys. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 21, 4, 532–535. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.4.9699>
13. 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>
14. Sun, D.Q., Liu, W.H., Gu, X.Y. (2004) Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (Mg – 3Al – 1Zn) using copper interlayer. *Materials Science and Technology*, 20, 12, 1595–1598. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328413X13789824293506>
15. Abdulaziz Nasser AlHaza, Muhammad Ali Shar, Anas Mahmoud Atieh, Hiroshi Nishikawa (2018) Transient Liquid Phase Bonding of Magnesium Alloy AZ31 Using Cu Coatings and Cu Coatings with Sn Interlayers. *Metals*, 8, 60–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.09.006>
16. Dehnavi, F., Bakhtiari, R. (2021) Effect of microstructure aspects on mechanical properties of nanoparticle-assisted transient liquid phase (NP-TLP) joints for AZ31 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 42–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.032>
17. Sohrab Ghahri Saremi, Seyyed Ehsan Mirsalehi, Ali Shamsipur (2018) Transient liquid phase bonding of AZ31 magnesium alloy: Metallurgical structure and mechanical properties. *Ibid*, 35, 140–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.002>
18. Torun, O., Karabulut, A., Baksan, B., Çelikyürek, I. (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>
19. 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, 116519, P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>
20. 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>
21. 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. *Journal of King Saud University – Science*, 28, 152–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.09.006>
22. Ramanujam, N., Rajamuthamilselvan, M., Girish, G. (2016) Investigation on Mechanical Properties of Diffusion Bonded AZ-91 Magnesium Alloy Reinforced with Sic Particles. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5, 12, 159–166.
23. Ren, L., Li, B., Chen, Z. et al. (2021) Interfacial Microstructure Analysis of AZ31 Magnesium Alloy during Plastic Deformation Bonding. *Processes*, 9, 1857–1867. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9101857>
24. Lingxiao Ouyang, Yunwei Gui, Quanan Li, Yunqiang Fan (2021) Isothermal compression bonding mechanism and mechanical properties of WE43 magnesium-rare earth alloy. *Materials Science & Engineering A*, 822, 141664, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141664>
25. Lai Zhiwei, Chen Xiaoguang, Pan Chuan et al. (2016) Joining Mg alloys with Zn interlayer by novel ultrasonic assisted transient liquid phase bonding method in air. *Materials Letters*, 166, 219–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.031>
26. Zhiwei Lai, Ruishan Xie, Chuan Pan et al. (2017) Ultrasound-assisted Transient Liquid Phase Bonding of Magnesium

- Alloy Using Brass Interlayer in Air. *Journal of Materials Science & Technology*, 33, 6, 567–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.11.002>
27. Zhiwu, Xu, Zhengwei, Li, Liming, Peng, Jiuchun, Yan (2019) Ultra-rapid transient liquid phase bonding of Mg alloys within 1 s in air by ultrasonic assistance. *Materials and Design*, 161, 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.015>
28. Zhiwu Xu, Shu Chen, Liming Peng et al. (2020) Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonically TLP bonded Mg joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 52, 145–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.056>
29. Xixin Rao, Yunpeng Wu, Xiaobing Pei et al. (2019) Influence of rolling temperature on microstructural evolution and mechanical behavior of AZ31 alloy with accumulative roll bonding. *Materials Science & Engineering A*, 754, 112–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.047>
30. Akhmad Saufan, Ing-Song Yu, Jian-Yih Wang (2020) Enhancement of mechanical properties for Mg–9Li–1Zn alloy by accumulative roll bonding. *Materials Research Express*, 7, 046511, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab86f8>
31. Zuzanka Trojanová, Ján Džugan, Kristýna Halmešová et al. (2018) Influence of Accumulative Roll Bonding on the Texture and Tensile Properties of an AZ31 Magnesium Alloy Sheets. *Materials*, 11, 73, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11010073>

MODERN TECHNOLOGICAL METHODS OF PRESSURE WELDING OF MAGNESIUM ALLOYS (Review)

Yu.V. Falchenko, L.V. Petrushinets

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

Proceeding from the results of literature analysis, the good prospects for application of pressure welding methods, namely diffusion, ultrasonic, and roll welding, when joining elements from magnesium alloys, are shown. Comparative evaluation of welding modes was performed. The main directions for producing sound joints were determined. It is shown that the main ways to improve the welding processes are application of the following approaches: monitoring the temperature-time parameters of welding, application of interlayers in the form of separate layers from similar materials, based on copper, nickel, zinc or silver, or of eutectic mixtures, butt joint strengthening through application of nano- or finely-dispersed particles, intensification of plastic deformation through superposition of ultrasonic oscillations, increase of plastic deformation intensity, as well as application of heat treatment before and after welding. 31 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: magnesium alloys, welded joints, microstructure, strength, diffusion welding, ultrasonic welding, roll welding

Надійшла до редакції 18.04.2022

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1 IN THE WORLD