

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОРИСТОГО СПЛАВА АЛЮМИНИЯ С МОНОЛИТНЫМ СПЛАВОМ МАГНИЯ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГАЛЛИЕМ

Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, М. А. ХОХЛОВ, Ю. А. ХОХЛОВА, В. С. СИНЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В рамках отработки технологической задачи — получение сверхлегких сварных конструкций из пористых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Zn с монолитными магниевыми сплавами (стандартный сплав МЛ4 системы Mg–Al–Zn и экспериментальный сплав системы Mg–Ga) проведено комплексное исследование механических и физических свойств диффузионной зоны полученных соединений с целью оценки влияния на них цикла нагрева, характерного для разных видов сварки. Сварку проводили двумя способами с максимальной температурой нагрева до 300 °С: диффузионную сварку, сопровождающуюся длительным циклом нагрева в вакууме, и сварку проходящим током на воздухе, для которой характерен кратковременный цикл нагрева. Для формирования сплошного соединения и активации диффузии использовали галлий. Установлено, что на стороне пористого алюминия формируется диффузионная зона шириной около 10 мкм с незначительным снижением микромеханических свойств в стенках пор, что типично для алюминиевых сплавов при контакте с галлием. В магниевых сплавах, при обоих способах сварки, вдоль линии соединения формируется обширная (60...100 мкм) волнистая интерметаллидно-упрочненная диффузионная зона, преимущественно состава Mg₃Ga₂ с температурой плавления 456 °С, что выше температуры сварки. Таким образом, показана возможность соединения пористых сплавов с монолитными при незначительном их нагреве и химической активации зоны соединения галлием. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: магний, пористый алюминий, галлий, диффузионная сварка, сварка проходящим током, механохимическая активация

Использование сверхлегких пористых сплавов позволяет создавать конструкции с высокой удельной прочностью, т. е. рациональным соотношением прочности к массе. В зависимости от плотности и типа пористости, такие материалы легче монолитных на 50...80 % [1]. Несмотря на разнообразие пористых металлов промышленного производства, широкое их применение до сих пор затруднено по причине дороговизны и сложности производства, но вполне оправдано для технических решений, направленных на создание корпусных или многослойных защитных элементов микроэлектроники аэрокосмического назначения, когда приоритетным показателем является минимизация массы конструкции [2]. Пористые металлы входят в десятку рейтинга «Материалов Будущего», как и магниевые сплавы, масса которых на 30 % меньше традиционно используемых алюминиевых сплавов.

Имеющиеся для проведения экспериментов новые пористые материалы на основе алюминия (ПА) производства фирмы «MetalFoam» (Германия) (рис. 1), а также опыт получения сварных соединений при температурах порядка 300 °С [3–6], разработанный для создания биметаллических блоков капсулирования микроэлектроники, позволил нам актуализировать и продолжить исследования, на-

правленные на создание сверхлегких многослойных биметаллических сэндвич-панелей с использованием пористых и монолитных сплавов, в различной последовательности и комбинации.

Целью работы являлось получение биметаллических соединений сэндвич-панелей ПА с монолитными магниевыми сплавами на основе механохимической активации галлием, ограничения



Рис. 1. Панели пористого алюминия производства фирмы «MetalFoam» с и без монолитных стенок

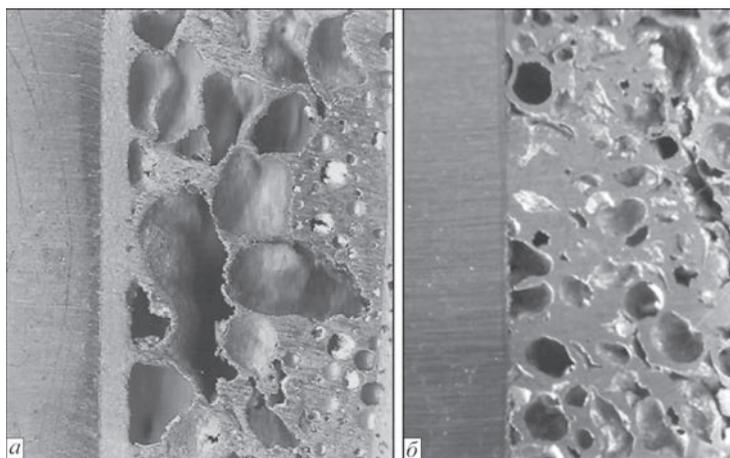


Рис. 2. Сварные соединения монолитного магниевого сплава МЛ4 с панелями ПА: с монолитными стенками (а) и без них (б)

температуры сварки до 300 °С и применения двух способов сварки с различной скоростью и продолжительностью нагрева. Для технологической оценки оптимальности применения кратковременного или продолжительного нагрева было проведено комплексное исследование особенностей формирования микроструктуры, химического и фазового состава, микромеханических свойств диффузионной зоны полученных образцов.

Соединяемые пары сплавов: ПА (системы Al–Mg–Zn) со стандартным магниевым сплавом МЛ4 (системы Mg–Al–Zn) и ПА с экспериментальным легированным сплавом (системы Mg–Ga).

ПА содержит большое количество наполненных газом пор диаметром 1...2 мм, пустоты составляют около 80 % общего объема материала.

Содержание основных химических элементов соединяемых материалов, мас. %

Материал	Al	Mg	Zn	Ga
ПА	83,2	6,7	5,9	-
МЛ4	5,0...7,0	88,4...92,9	2,0...3,5	-
МЛ4+Ga	5,0	80,0	2,5	10,0

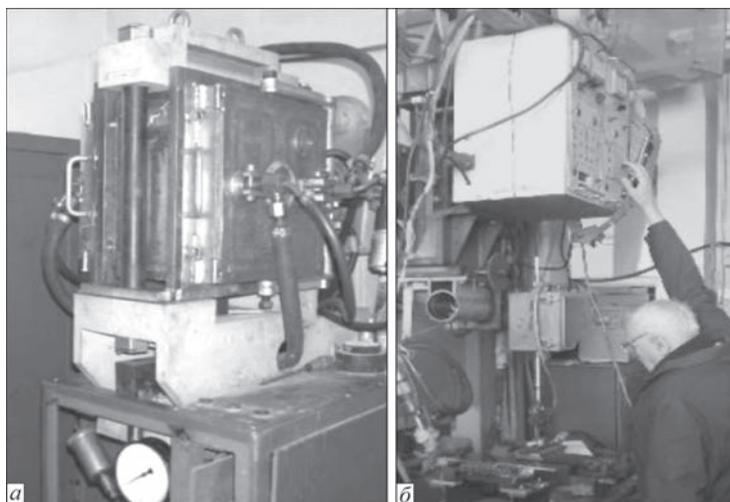


Рис. 3. Оборудование для сварки с различными скоростями нагрева: а — установка П-115; б — лабораторная установка

При деформации ПА показывает нелинейное поведение, характерное для пористых структур, поэтому материал имеет высокий коэффициент ударопоглощения (способен адсорбировать кинетическую энергию удара). ПА характеризуется низкой гигроскопичностью (1...3 %), нетоксичен, термостоек, не разрушается при воздействии горюче-смазочных веществ, растворителей, ультрафиолета и радиации. При воздействии открытого огня он постепенно размягчается, если температура в зоне нагрева достигает температуры плавления 650 °С. Микротвердость (по Мейеру) стенок пор ПА составляет 1,5 ГПа, модуль упругости Юнга 69 ГПа.

Магнийевый литейный сплав МЛ4 применяется для изготовления деталей двигателей и других агрегатов, работающих в условиях статических и динамических нагрузок. Предельная рабочая температура: 150 — длительная, 250 °С — кратковременная. Температура плавления 720...750 °С. Микротвердость (по Мейеру) 1,2 ГПа, модуль упругости Юнга 43 ГПа.

Экспериментальный магнийевый сплав системы Mg–Ga (64Mg + 32Mg₅Ga₂ мас. %) на основе стандартного МЛ4, легированного галлием и модифицированного высокодисперсными частицами диоксида циркония (диаметром 20 нм), был получен при индукционном переплаве в среде аргона [7] без последующей обработки. Температура плавления 750 °С. Сплав дисперсионно упрочнен интерметаллидами Mg₅Ga₂ и модификаторами, поэтому имеет повышенные значения микротвердости (по Мейеру) 4...16 ГПа, модуль упругости Юнга 120...250 ГПа.

Содержание основных химических элементов соединяемых материалов приведено в таблице.

Соединения из панелей ПА толщиной 10 мм и листов МЛ4 толщиной 6 мм (рис. 2) проводили двумя разными способами: диффузионной сваркой в течение 3 ч в условиях вакуума и сваркой проходящим током низкого напряжения в течение 2 мин, в условиях комнатной среды. Для диффузионной сварки применяли установку П-115 (рис. 3, а), а для сварки проходящим током — лабораторную установку (рис. 3, б).

Для удаления оксидных пленок и активации свариваемых поверхностей проводили смачивание предварительно шлифованных соединяемых поверхностей расплавленным при 27,75 °С техническим галлием.

Исследования микроструктуры диффузионной зоны образцов и распределение

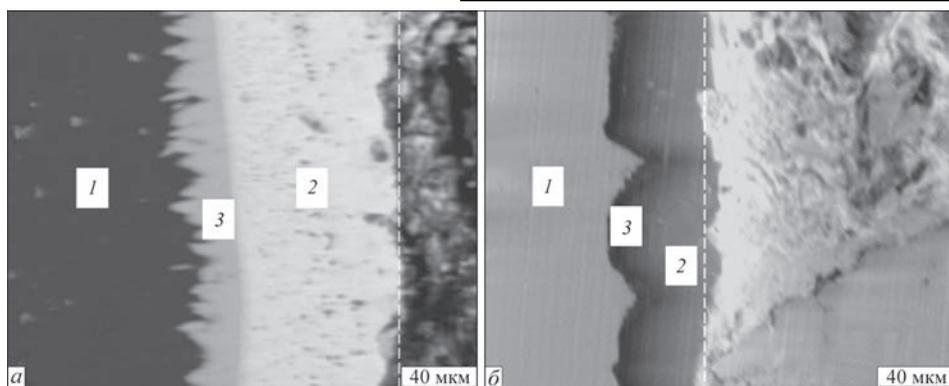


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения, полученной при длительном нагреве в условиях ДСВ (а) и кратковременном нагреве проходящим током (б) (пунктиром обозначена линия нанесения галлия, справа от линии — ПА, слева — магниевый сплав МЛ4; обозначения 1–3 см. в тексте)

химических элементов проводили сканирующим электронным микроскопом JSM-35CF «JEOL», оснащенный спектрометром INCA Energy-350 «Oxford Instruments» (СЭМ).

Коэффициент диффузии оценивали по упрощенной формуле $D = x^2/T$, где x — максимальная глубина внедрения галлия, T — продолжительность сварки.

Диффузия галлия в ПА характеризуется диапазоном глубины около 10 мкм и отсутствием четкой зоны, концентрация 5...20 мас. %, экспериментальный коэффициент диффузии при длительном нагреве (со скоростью 5 °С/мин) в вакууме составляет $0,0092 \cdot 10^{-12}$ м²/с и при кратковременном (со скоростью 150 °С/мин) нагреве проходящим током $0,5555 \cdot 10^{-12}$ м²/с.

Волнистый фронт диффузии на стороне МЛ4 наблюдался при обоих способах сварки (рис. 4). При длительном нагреве формируется диффузионная зона шириной 85...100 мкм, а при кратковременном нагреве с пропуском тока шириной до 35...60 мкм. Экспериментальный коэффициент диффузии составляет, соответственно: $0,92 \cdot 10^{-12}$ и $20 \cdot 10^{-12}$ м²/с.

Исследование количественного химического состава диффузионной зоны со стороны магниевых сплавов (рис. 4, зона 1 — основной металл) показало наличие двух областей с отличным хи-

мическим составом. Зона 2 (ближе к месту нанесения активатора) содержит, мас. %: 35Mg и 64Ga, зона 3 — 73Mg и 24Ga. Основываясь на упрощенной схеме анализа легирования магния при диффузии в него галлия [8] и согласно бинарной диаграмме этой химической системы, формируются интерметаллидные соединения MgGa, Mg₂Ga и Mg₅Ga₂ с температурой плавления 373...456 °С, что является выше температуры сварки.

В предварительно легированном галлием экспериментальном магниевом сплаве на основе стандартного МЛ4 при активации соединения галлием происходит выравнивание химического состава приконтактной зоны и основного материала (рис. 5). Четко выделенная диффузионная зона отсутствует.

Микромеханическое тестирование диффузионной зоны соединений проводили по стандартным методикам [9, 10] согласно ISO / FDIS 14577-1: 2002 трехгранной алмазной пирамидкой Берковича [11] и использованием прибора «Микрон-гамма». Прибор фиксирует микротвердость по Мейеру и модуль упругости Юнга при автоматической регистрации перемещения индентора Берковича, в зависимости от приложенной к нему нагрузки. Максимальная нагрузка 500 г; погрешность по нагрузке 0,001 г; погрешность по глубине внедрения индентора 5 нм; максимальная глубина инденти-

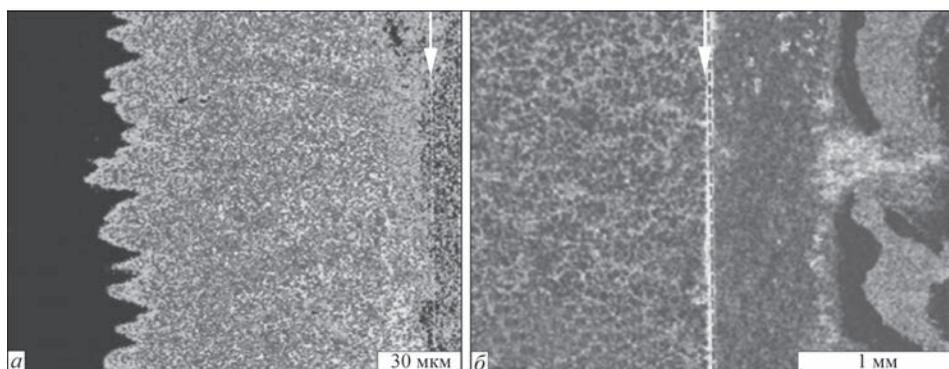


Рис. 5. Элементная карта распределения галлия в базовом сплаве МЛ4 (а) и в легированном (б). Пунктиром и стрелкой обозначена линия нанесения галлия, справа от линии — ПА, слева — магниевые сплавы

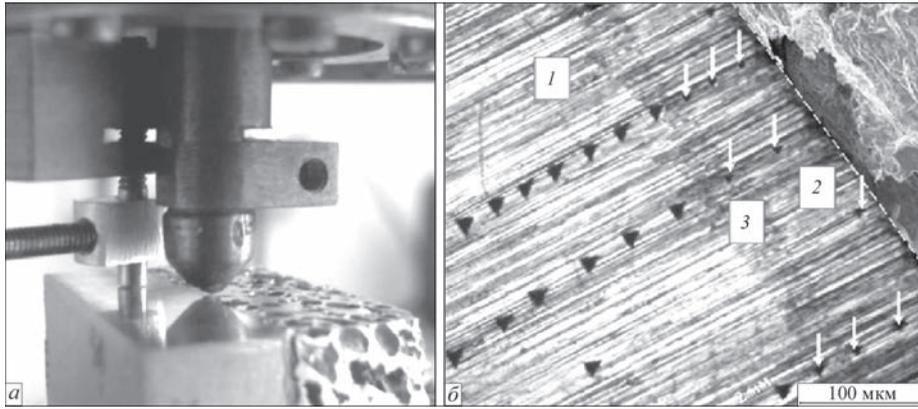


Рис. 6. Микромеханическое испытание соединения МЛ4+ПА на приборе «Микрон-гамма» (а) и отпечатки индентора в диффузионной зоне на стороне магниевого сплава МЛ4 (б) (стрелочками указаны отпечатки меньшей площади, характеризующие упрочнение; пунктиром обозначена линия нанесения галлия)

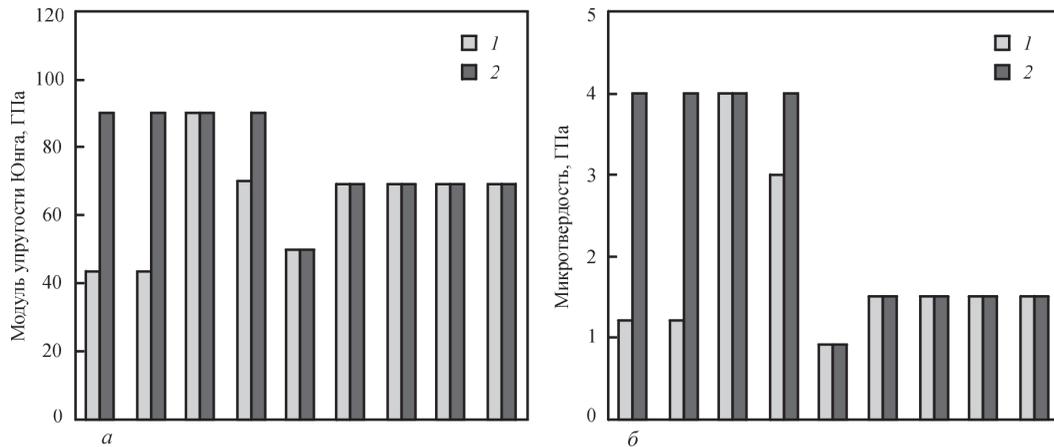


Рис. 7. Диаграмма тенденций распределения модуля упругости Юнга (а) и твердости (б) поперек диффузионной зоны соединения: 1 — МЛ4/ПА; 2 — Mg+Ga/ПА

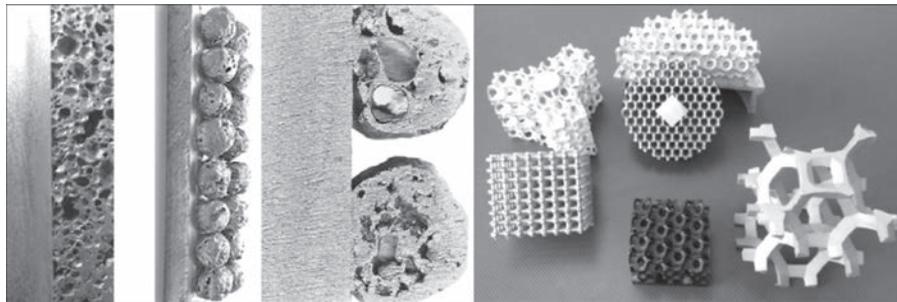


Рис. 8. Крепление разнообразных промышленно производимых ячеисто-пористых металлов на монолитную основу

рования 200 мкм. Результаты представлены в виде диаграмм индентирования при нагрузке 20 г с шагом 50 мкм. Подготовку образцов для индентирования проводили в соответствии со стандартной процедурой полировки легких сплавов до образования зеркальной поверхности и без травления.

Со стороны ПА ширина диффузионной зоны имеет снижение твердости от 1,5 до 1,0 ГПа, модуля Юнга от 70 до 50 ГПа. В диффузионной зоне со стороны сплава МЛ4 (рис. 6) наблюдается значительное повышение модуля Юнга от 42 до 73...110 ГПа и микротвердости от 1,2 до 4,5 ГПа.

Предварительное легирование галлием магниевого сплава приводит к равномерному уровню мо-

дуля Юнга и микротвердости основного материала и приконтактной зоны (рис. 7).

С помощью сварки с применением химической активации галлием возможно крепление разнообразных промышленно производимых ячеисто-пористых металлов на монолитную основу (рис. 8).

Выводы

1. Показана возможность получения соединений при 300 °С двумя способами сварки, существенно отличающимися продолжительностью и скоростями нагрева, применительно к производству сверхлегких многослойных биметаллических сэндвич-панелей с использованием пористых и мо-

нолитных сплавов на основе алюминия и магния, в различной последовательности и комбинации, с применением химической активации галлием.

2. Исследование микроструктуры и карт распределения химических элементов в диффузионной зоне соединения показало, что волнообразный фронт диффузии галлия в монолитном магниевом сплаве является типичным по химическому составу для обоих способов сварки. Микромеханические исследования диффузионной зоны соединений показали значительное повышение микротвердости и модуля упругости Юнга со стороны монолитного магниевого сплава МЛ4, выравнивание этих значений в диффузионной зоне и основном металле в легированном галлием сплаве МЛ4, а также незначительное снижение микромеханических свойств в стенках пор алюминиевого сплава. Таким образом, продолжительность и скорость нагрева, в зависимости от используемой технологии сварки и оборудования, влияет только на ширину диффузионной зоны.

Результаты исследований получены при выполнении ведомственной программы НАН Украины «Исследование структурных превращений в швах и разработка технологий сварки тонколистовых оболочечных и спутниковых конструкций из алюминиевых и разнородных материалов для обтекателей и адаптеров ракетно-космической техники» и молодежной научно-исследовательской поисковой программы НАН Украины для молодых ученых «Отработка способа соединения в твердой фазе монолитных магниевых сплавов с вспененным алюминием».

1. Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications; ed. by H.-P. Degischer and B. Kriszt 2002 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – P. 392.
2. Хохлов М. А., Ищенко Д. А. Технологические свойства сверхлегких пористых металлов (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3-4. – С. 60–65.
3. Патон Б. Е., Ищенко А. Я., Устинов А. И. Применение нанотехнологии неразъемного соединения перспективных легких металлических материалов для аэрокосмической техники // Там же. – 2008. – № 12. – С. 5–12.
4. Изготовление переходников нержавеющей сталь-алюминий способом сварки давлением в вакууме / Г. К. Харченко и др. // Там же. – 2012. – № 1. – С. 30–32.
5. Пат. 69145 UA, МПК (2012.01) B01B 1/00, B23K 1/00. Спосіб з'єднання біметалевого блока для термоізоляції елементів мікроелектроніки / М. А. Хохлов, Ю. А. Хохлова; заявники та патентовласники. – № 201110712; заявл. 05.09.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
6. Khokhlova J. Inter-Granular Phase Formation during Reactive Diffusion of Gallium with Al Alloy // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 768–769. – P. 321–326.

7. Khokhlova J., Khokhlov M., Synyuk V. Magnesium alloy AZ63A reinforcement by alloying with gallium and using high-disperse ZrO₂ particles // Journal of Magnesium and Alloy. – 2016. – Vol. 4, Dec. – P. 265–269.
8. Khokhlov M., Ishchenko D., Khokhlova J. Peculiarities of forming diffusion bimetallic joints of aluminum foam with a monolithic magnesium alloy // Ibid. – 2016. – Vol. 4, December. – P. 326–329.
9. Kazuhisa Miyoshi. NASA/TM-2002-211497 Surface Characterization Techniques: An Overview. – 2002. – P. 12–22. (Электронный ресурс: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020070606.pdf>).
10. Oliver W. C., Pharr G. M. An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research. – 1992. – № 7. – P. 1564–1583.
11. Nano indenters from micro star technologies. Revision 2.3. P.9. (Электронный ресурс: <http://www.microstartech.com/index/nanoindenters.pdf>).

Ю. В. Фальченко, М. А. Хохлов,
Ю. А. Хохлова, В. С. Синюк

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ФОРМУВАННЯ ДИФУЗІЙНОЇ ЗОНИ ЗВАРНИХ
З'ЄДНАНЬ ПОРИСТОГО СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ
З МОНОЛІТНИМ СПЛАВОМ МАГНІЮ
ПРИ ХІМІЧНІЙ АКТИВАЦІЇ ГАЛІЄМ

В рамках відпрацювання технологічного завдання — отримання надлегких зварних конструкцій з пористих алюмінієвих сплавів системи Al–Mg–Zn з монолітними магнієвими сплавами (стандартний сплав МЛ4 системи Mg–Al–Zn і експериментальний сплав системи Mg–Ga) проведено комплексне дослідження механічних та фізичних властивостей дифузійної зони отриманих з'єднань, з метою оцінки впливу на них циклу нагрівання, характерного для різних видів зварювання. Зварювання проводили двома способами з максимальною температурою нагрівання до 300 °С: дифузійне зварювання, що супроводжується тривалим циклом нагрівання у вакуумі, і зварювання прохідним струмом на повітрі, для якого характерний короткочасний цикл нагрівання. Для формування суцільного з'єднання і активації дифузії використовували галій. Встановлено, що на стороні пористого алюмінію формується дифузійна зона шириною близько 10 мкм з незначним зниженням мікромеханічних властивостей в стінках пор, що є типовим для алюмінієвих сплавів при контакті з галієм. У магнієвих сплавах, при обох способах зварювання, уздовж лінії з'єднання формується велика (60...100 мкм) хвиляста інтерметалідно-зміцнена дифузійна зона, переважно складу Mg₅Ga₂ з температурою плавлення 456 °С, що вище температури зварювання. Таким чином, показана можливість з'єднання пористих сплавів з монолітними при незначному їх нагріванні та хімічної активації зони з'єднання галієм. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: магній, пористий алюміній, галій, дифузійне зварювання, зварювання прохідним струмом, механохімічна активація

Поступила в редакцію 21.12.2016