



СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СО₂-ЛАЗЕРА*

В. КАЛИТА (Ин-т фундаментальных технологических исследований ПАН, г. Варшава, Республика Польша),
П. КОЛОДЗЕЙЧАК (Варшавский техн. ин-т, Республика Польша),
Л. КВЯТКОВСКИ, М. ГРОБЕЛЬНЫ (Ин-т прецизионной механики, г. Варшава, Республика Польша),
Ж. ХОФФМАН (Ин-т фундаментальных технологических исследований ПАН, г. Варшава, Республика Польша)

Описаны результаты исследований по лазерной сварке разнородных магниевых сплавов. Была выполнена сварка изделий из групп сплавов MgAlZn (хрупкий) и MgAlMn (пластичный) с применением СО₂-лазера максимальной мощности 2,5 кВт. Получены швы без дефектов и с почти параллельными границами при заданной скорости подачи защитного гелия и фокусном расстоянии пучка, установленном на поверхности металла. Анализ микроструктуры соединений, измерения распределения твердости и распределения элементов в поперечном сечении швов позволили определить изменения, обусловленные воздействием пучка и рекристаллизацией. Статические испытания предела прочности на растяжение позволили определить условия, при которых можно получить соединения с удовлетворительными механическими свойствами. Представлены также данные испытаний на коррозию при погружении.

Ключевые слова: лазерная сварка, СО₂-лазер, магниевые сплавы, разнородные соединения, микроструктура, механические свойства, коррозионная стойкость

Магниевые сплавы по сравнению с такими традиционными материалами, как сталь и сплавы алюминия, отличаются более пониженной плотностью, что вызвало повышенный интерес к ним со стороны автомобильной и авиационной промышленности. Разработка новых магниевых сплавов с механическими свойствами, подобными традиционным материалам [1], позволяет использовать их в качестве деталей для литья [2]. Благодаря снижению массы и потреблению топлива оказалось возможным полностью удовлетворить требования по защите окружающей среды [3] и безопасности перевозки [4]. Однако изготовление и обработка листовых элементов и облегченных модульных конструкций все еще находятся в стадии разработки. В связи с этим особое внимание уделяется лазерной сварке магниевых сплавов [5–18]. Большинство исследований, проводимых до настоящего времени, касалось сварки однородных сплавов, однако для расширяющейся области применения заготовок специального раскроя представляет интерес лазерная сварка разнородных сплавов [5].

В процессе экспериментов прутки из литых магниевых сплавов AM50 и AZ91 (см. таблицу) подвергали механической обработке. Толщина пластин составляла 4,5 мм, ширина 50 мм и длина свариваемых кромок 100 мм.

Стыковую сварку пластин однородных и разнородных сплавов выполняли с помощью СО₂-лазера с быстрым аксиальным потоком газа и модой пучка, близкой к TEM₁₀, сфокусированного до диаметра 0,25 мм с помощью линз из ZnSe размером 5". Присадочный металл не использовался. Были выбраны следующие оптимальные условия сварки: мощность лазера 2,0 кВт, скорость сварки 4 м/мин, фокусное расстояние пучка — на лицевой стороне пластин (выбрано после оценки влияния фокусного расстояния на форму шва). Защиту лицевых сторон обеспечивали подачей гелия со скоростью 15 л/мин через сопло диаметром 4 мм, нижних — обдувкой аргоном.

Микроструктуру и твердость профилей определяли по поперечному сечению, перпендикулярному направлению сканирования пучка, а также параллельному лицевой стороне вдоль шва. Для того чтобы установить любые изменения, вызванные воздействием лазерного пучка (например, испарение материала и конвекция), провели анализ распределения основных элементов с помощью рентгеновского микрозонда. Механические свойства соединений определяли с помощью испытаний на стенде «Инстрон», предназначенном для статических испытаний основных сплавов и швов на растяжение. С помощью сканирующего элек-

Сплав	Легирующие элементы, мас. %		
	Al	Mn	Zn
AM50	5	0,3	0,2
AZ91	9	0,17	0,7

* По материалам Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing», 23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым, Украина.

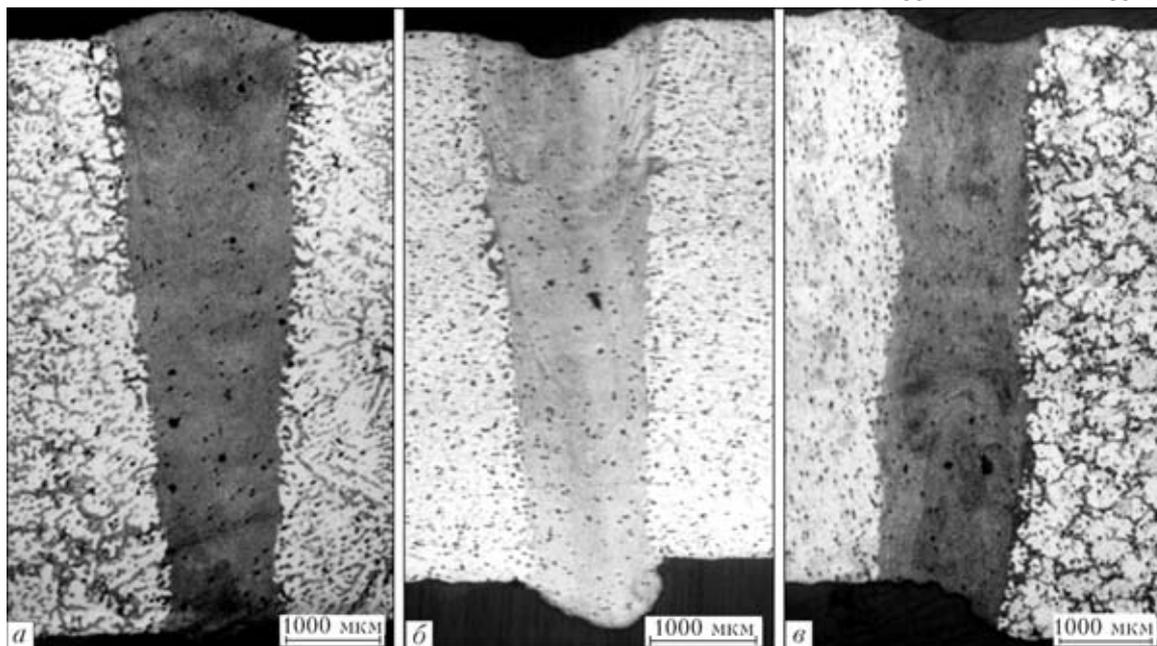


Рис. 1. Макроструктура стыковых сварных соединений: *a* — AZ91–AZ91; *б* — AM50–AM50; *в* — AM50–AZ91

тронного микроскопа получены изображения разрушений изделий для сравнения с растяжениями по основному металлу. Сварные образцы выдерживали в нейтральном растворе 0,15 М NaCl в течение 22 дней. После трехдневной выдержки водородный показатель pH изменился приблизительно на 11 ед. и оставался стабильным до конца эксперимента.

Макроструктура стыковых сварных соединений однородных и разнородных сплавов приведена на рис. 1. Границы зоны сплавления (ЗС) практически параллельны и коэффициент формы шва (отношение толщины пластины к средней ширине ЗС) достаточно высок. Это означает, что соединение формируется благодаря эффекту узкого парогазового канала при проникновении пучка. Поры в основном материале отсутствуют и после сварки в ЗС они практически не наблюдаются. Трещины также не обнаружены.

Благодаря необходимому времени излучения, которое в первом приближении определяется как отношение диаметра пучка к скорости сварки (менее 4 мс), и быстрому затвердеванию ЗС характеризуется значительным измельчением зерен (рис. 2). Резкий переход от основного металла к ЗС при незаметном направлении затвердевания на границах этих зон может свидетельствовать об отсутствии ЗТВ, что, в свою очередь, можно легко определить, например, в соединениях из стали или сплавов алюминия.

Измерения распределения твердости в поперечном направлении соединений (перпендикулярно направлению сварки) показали значительное повышение твердости в ЗС по сравнению с основным металлом (рис. 3). Такие результаты связаны не только с высоким измельчением зерен в шве, но и с увеличением выделения вторичных фаз по границам зерен и появлением интерме-

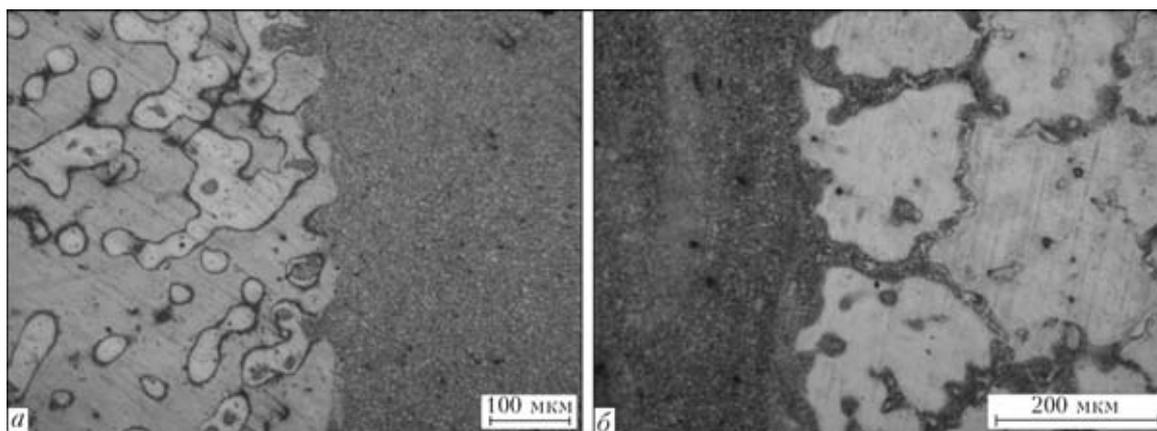


Рис. 2. Микроструктура перехода от ЗС к основному металлу в соединении из разнородных сплавов AM50–AZ91: *a* — AM50 слева от ЗС; *б* — AZ91 справа

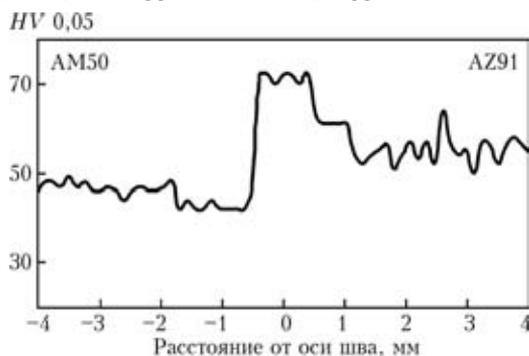


Рис. 3. Распределение твердости в поперечном направлении соединений на разнородных сплавах, измеренное на расстоянии 1,5 мм от лицевой поверхности

таллидных соединений. Некоторые из этих факторов требуют дальнейших исследований.

Для определения изменений в химическом составе материалов, вызванных воздействием пучка, выполнены измерения распределения элементов с помощью рентгеновского микрозонда. Установлено, что благодаря очень низкой температуре кипения магния по сравнению с алюминием, процентное содержание магния в соединениях однородных сплавов слегка понизилось из-за его испарения.

Кривые напряжение–деформация соединений однородных сплавов и основных металлов приведены на рис. 4. Было отмечено, что разрушение сварных образцов всех сплавов появляется вдали от границ ЗС — в области основного металла. Как и предполагалось, соединения однородных сплавов имеют меньшее относительное удлинение при разрушении, чем основной металл. Однако значения растягивающего напряжения разные: для соединения AM50–AM50 напряжение разрыва меньше, а для AZ91–AZ91 больше, чем для образцов из основного металла. В соединениях разнородных сплавов образцы разрушаются со стороны AZ91, но и далеко от ЗС.

Сравнение кривых напряжение–деформация для всех сварных соединений приведено на рис. 5. Согласно предположениям, значение относительного удлинения при разрушении разнородных соединений находится между значениями для соединений из хрупкого сплава AZ91 и пластичного AM50.

Поскольку разрушение сварных образцов происходит вдали от ЗС, то изображения поверхностей разрушения изделий из основного металла и образцов с соединениями, выполненными с помощью СЭМ, не отличаются между собой.

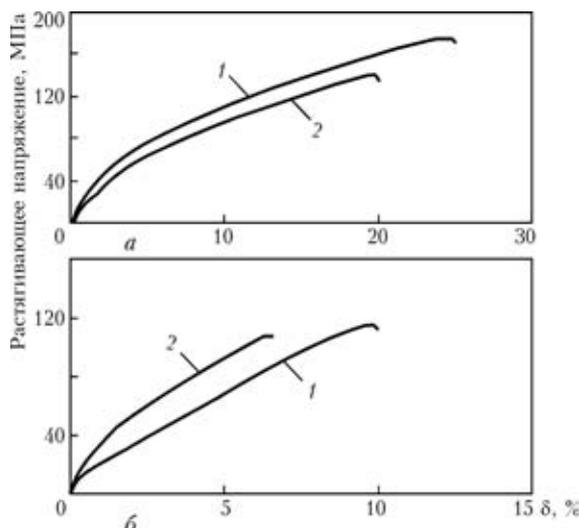


Рис. 4. Диаграммы напряжение–деформация соединений однородных сплавов: а — AM50; б — AZ91: 1 — основной металл; 2 — соединение

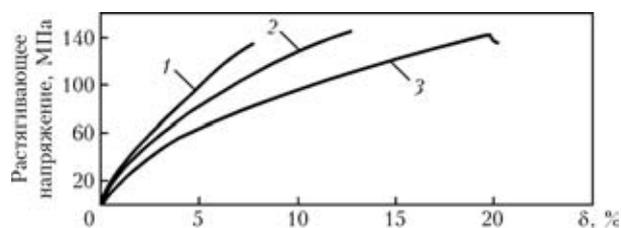


Рис. 5. Диаграмма напряжение–деформация соединений однородных и разнородных сплавов: 1 — AZ91–AZ91; 2 — AZ91–AM50; 3 — AM50–AM50

Для определения коррозионных характеристик сварных соединений проведены испытания сварных образцов на коррозию (рис. 6) при погружении на 22 дня в раствор 0,15 М NaCl. Изменения внешнего вида на лицевой и обратной сторонах образцов аналогичны, поэтому на рисунке представлена только лицевая сторона. Видно, что между разнородными сплавами образуется гальваническая пара. Часть образца, выполненная из AZ91,

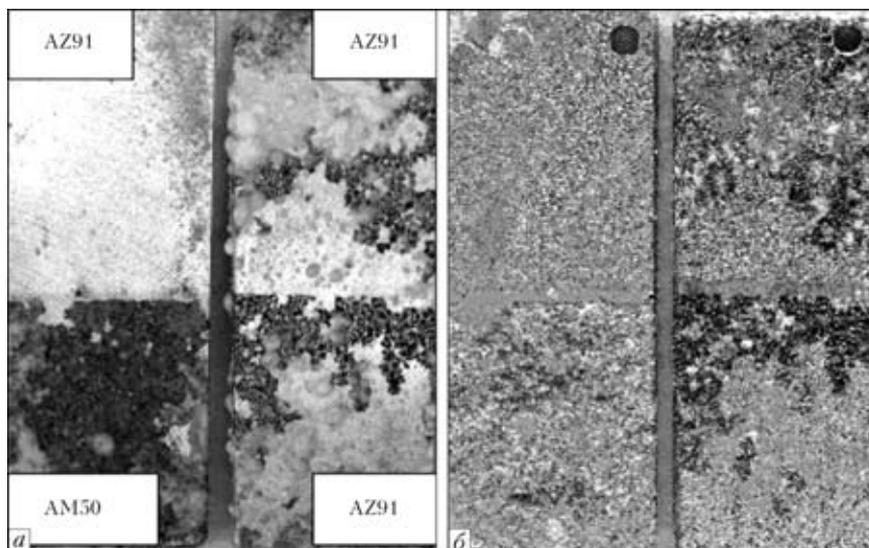


Рис. 6. Внешний вид прокорродированных поверхностей: а — после извлечения из раствора; б — после удаления продуктов коррозии, появившихся в результате травления с помощью H₂SO₄

защищена и имеет лучшее состояние поверхности, чем у образца пары AZ91–AZ91. При этом AM50 выполняет функцию защитного электрода. Отмеченные результаты заслуживают внимания в связи с тем, что получены в условиях незначительного различия в потенциалах электродов гальванических пар. В результате дополнительных исследований [18] получены следующие результаты: для AZ91 $E_{\text{корр}} = -1,5473$, для AM50 — $-1,5826$ В (по сравнению с нормальным электродом сравнения). Разница составляет приблизительно 35 мВ, что не считается чрезвычайно высоким показателем для электрохимической коррозии (обычно пределом считается 50 мВ).

В заключение следует отметить, что сварка CO₂-лазером однородных и разнородных магниевых сплавов с одинаковыми режимами (для пластины толщиной 4,5 мм: мощность лазера 2 кВт, скорость 4 м/мин, защита — гелий, фокусное расстояние на лицевой стороне) позволила получить приблизительно одинаковые коэффициенты формы шва в ЗС практически с отсутствием пористости и трещин. ЗТВ и направление затвердевания на границах ЗС не определяли.

Во всех случаях наблюдается высокое измельчение зерен и выделения вторичных фаз в ЗС, что повышает твердость в этих зонах.

При статических испытаниях на растяжение разрушение происходит далеко от шва (в основном металле). В шве из разнородных сплавов — со стороны хрупкого сплава AZ91. Обнаружено, что пластические свойства образцов со швами хуже, чем свойства исходных материалов.

Результаты испытаний на коррозию погружением, выполненные в растворе 0,15 М NaCl, показали, что сварка разнородных магниевых сплавов (в данном случае AZ91–AM50) повышает склонность к электрохимической коррозии, даже если разность значений потенциалов электрода невелика. Влияние самого шва весьма незначительно. Для уточнения результатов требуются дальнейшие исследования.

1. Friedrich H., Schumann S. Research for a «new age of magnesium» in the automotive industry // J. Mater. Proc. Technol. — 2001. — 117. — P. 276–281.

2. Longworth S. J. P. The bolting of magnesium components in car engines: Diss. for University of Cambridge, 2001.
3. Aghion E., Bronfin B., Eliezer D. The role of the magnesium industry in protecting the environment // J. Mater. Proc. Technol. — 2001. — 117. — P. 381–385.
4. Mordike B. L., Ebert T. Magnesium. Properties — applications — potential // Mater. Sci. and Eng. — 2001. — A302. — P. 37–45.
5. Weishait A., Galun R., Mordike L. CO₂-laser beam welding of magnesium-based alloys // Welding J. — 1998. — 77, № 4. — P. 149–154.
6. Draugelates U., Schram A., Kettler C. Joining of magnesium alloys // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 1999. — 30, № 10. — S. 623–627.
7. CO₂-laser welding of magnesium alloys / M. Dhahri, J. E. Masse, J. F. Mathieu, G. Barreau et al. // SPIE «High-power lasers in manufacturing». — 2000. — 3888. — P. 725–732.
8. Laser weldability of WE43 magnesium alloy for aeronautic industry / M. Dhahri, J. E. Masse, J. F. Mathieu et al. // Proc. of the LANE 2001, Aug. 28–31, 2001, Erlangen, Germany. — P. 297–310.
9. Zhao H., DebRoy T. Pore formation during laser beam welding of die-cast magnesium alloy AM60B — mechanism and remedy // Welding Res. Suppl. — 2001. — P. 204–210.
10. Sun Z., Wei J., Pan D., Tan Y. K. A comparative evaluation on microstructures in TIG and laser welded AZ31 magnesium alloy // SIMTech Technical Report, PT/01/ 008/JT. — 2001. — P. 1–8.
11. Laser beam welding of magnesium alloys — new possibilities using filler wire and arc welding / H. Haferkamp, M. Goede, A. Bormann, P. Cordini // Proc. of the LANE 2001, Aug. 28–31, 2001, Erlangen, Germany. — P. 333–338.
12. Welding and weldability of AZ31B by gas tungsten arc and laser beam / S. Lathabai, K. J. Barton, D. Harris et al. // Proc. of the Magnesium Technology conf. 2003, March 2–6, 2003, San Diego. — P. 157–162.
13. Watkins K. G. Laser welding of magnesium alloys // Ibid. — P. 153–156.
14. Stern A., Munitz A., Koln G. Application of welding technologies for joining of Mg alloys. Microstructure and mechanical properties // Ibid. — P. 163–170.
15. Kalita W., Kolodziejczak P., Pokhmurska. H. Welding of Mg-based alloy AM20 by CO₂-laser beam. // Proc. Intern. conf. on «Laser Technologies in Welding and Materials Processing», May 19–23, 2003, Katsiveli, Ukraine. — P. 214–216.
16. Dasgupta A. K., Mazumder J. Laser welding of AM60 magnesium alloy // Proc. of the Magnesium Technology conf. 2004, March 14–18, 2004, Charlotte, USA. — P. 43–48.
17. Laser welding of magnesium-based alloys of MgAlZn group / P. Kolodziejczak, W. Kalita, J. Hoffman, A. Kolasa // Adv. in Manufacturing Sci. and Technol. — 2004. — 28, № 4. — P. 45–53.
18. Properties of the butt-welded joints of CO₂-laser welded Mg alloys / W. Kalita, P. Kolodziejczak, L. Kwiatkowski, J. Hoffman // Proc. of the LANE 2004, Sept. 21–24, 2004, Erlangen, Germany. — Vol. 1. — P. 317–328.

The paper presents the results of studies of laser welding of dissimilar magnesium alloys. Welding of products from MgAlZn (brittle) and MgAlMn (ductile) alloy groups was performed, using a CO₂-laser of the maximum power of 2.5 kW. Sound welds were produced with almost parallel boundaries at a set speed of shielding helium feed and focal distance of the beam positioned on the metal surface. Analysis of joint microstructure, measurement of hardness distribution and element distribution in the weld cross-section allowed determination of the changes due to the beam impact and recrystallisation. Static testing for ultimate tensile strength allowed determination of the conditions, at which joints with satisfactory mechanical properties can be obtained. Data on immersion corrosion are also given.

Поступила в редакцию 26.01.06