

## УПРОЧНЕНИЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ4 ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ ГАЛЛИЕМ

**М. А. Хохлов, Ю. А. Хохлова, В. С. Синюк, Ю. А. Никитенко**

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе представлены результаты исследования влияния изменения химического и фазового состава на упрочнение магниевого сплава при легировании галлием. Полученный экспериментальный слиток исследован методами рентгенофазового и спектрального анализа. Показано, что в результате легирования магниевого сплава галлием формируется интерметаллидная фаза  $Mg_3Ga_2$ . Механический тест методом микроиндентирования зафиксировал значительное повышение модуля Юнга от 42 до 73...110 ГПа и микротвердости от 1,2 до 2,0...4,5 ГПа. Библиогр. 8, ил. 7.

**Ключевые слова:** индукционный переплав; магний; галлий; легирование; упрочнение; индентирование

При контакте поверхности магниевых сплавов с галлием, который применяется в диффузионной сварке как активатор адгезии соединяемых поверхностей и последующей диффузии, наблюдается значительный эффект упрочнения приконтактной зоны [1–5]. Основываясь на упрощенной схеме анализа такого легирования, рассмотрена бинарная система (рис. 1) химического взаимодействия Mg–Ga. Определение химического состава диффузионной зоны методом растровой электронной микроскопии показало вероятность формирования интерметаллидных фаз  $MgGa$ ,  $Mg_2Ga$ ,  $Mg_3Ga_2$ .

Целью данной работы является исследование физико-химических причин упрочнения магниевого сплава при легировании галлием.

Для эксперимента были выбраны следующие материалы. Магниевый сплав марки МЛ4 применяется для изготовления деталей двигателей и других агрегатов, работающих в условиях высокой коррозионной стойкости, статических и динамических нагрузок. Предельная рабочая температура: 150 °С — длительная, 250 °С — кратковременная. Удельная вибропрочность в 100 раз больше, чем у алюминия. Сплав немагнитен, не искрит при ударе и трении.

Химический состав сплава МЛ-4, мас. %: 88,4...92,85 Mg; 5...7 Al; < 0,06 Fe; < 0,25 Si; 0,15...0,5 Mn; < 0,01 Ni; < 0,1 Cu; < 0,002 Zr; < 0,002 Be; 2,0...3,5 Zn, прочих 0,1 (всего, 5).

Технический галлий (99,9Ga–0,01Zn–0,03Cu, мас. %) — мягкий хрупкий металл. Температура плавления 29 °С и температура кристаллизации 15 °С.

Переплав с введением лигатуры провели методом индукционного нагрева установкой ЛЗ-107 в графитовом тигле, в проточной атмосфере аргона марки ВЧ. Пропорция переплава: магниевый сплав МЛ4 — 140 г; галлий технический — 20 г. Охлаждение расплава вместе с тиглем происходило при комнатной температуре в среде аргона.

### Технические характеристики установки ЛЗ-107

Ламповый преобразователь частоты ..... ЛЗ-107  
 Мощность преобразователя частоты, кВт ..... 100  
 Частота тока на индукторе, кГц ..... 66  
 Напряжение на индукторе, В ..... ~ 70...75.

Фрактографические исследования, определение количественного элементного состава и построение карт распределения элементов верхней поверхности слитка (рис. 2), среза (рис. 3 и 5) и

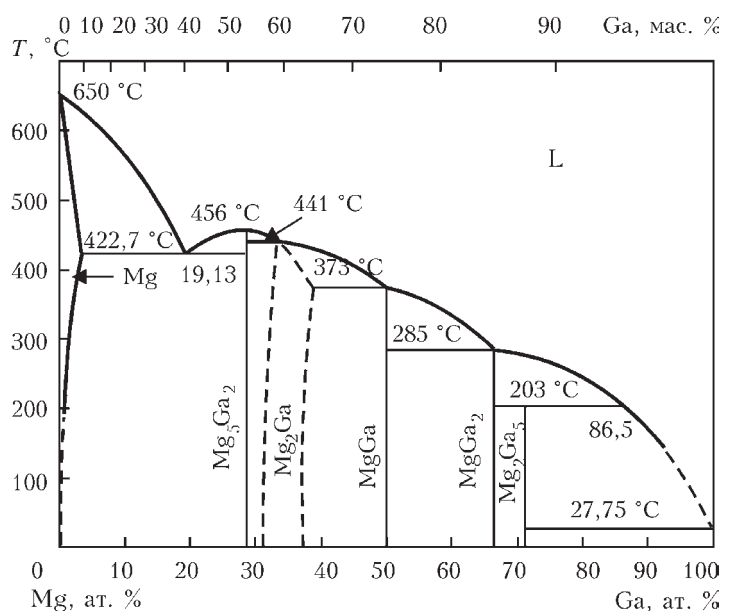
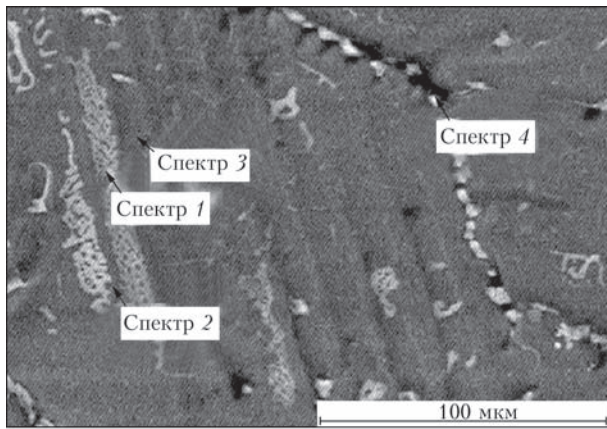


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Ga–Mg

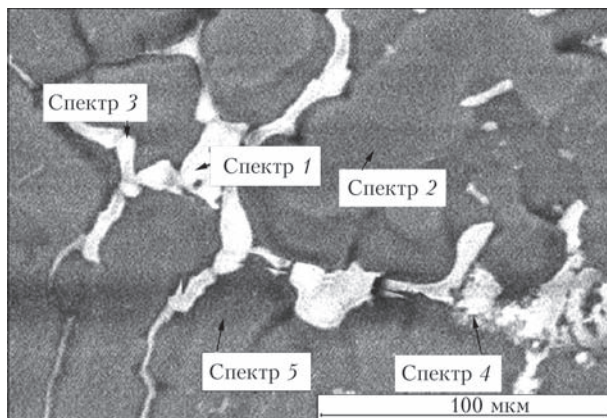


Спектр	Mg	Ga	Фаза
мас. %			
1	51,70	48,30	
2	86,68	13,32	Mg <sub>5</sub> Ga <sub>2</sub>
3	84,32	15,68	
4	86,45	13,55	

Рис. 2. Распределение химических элементов на верхней части слитка (СЭМ)

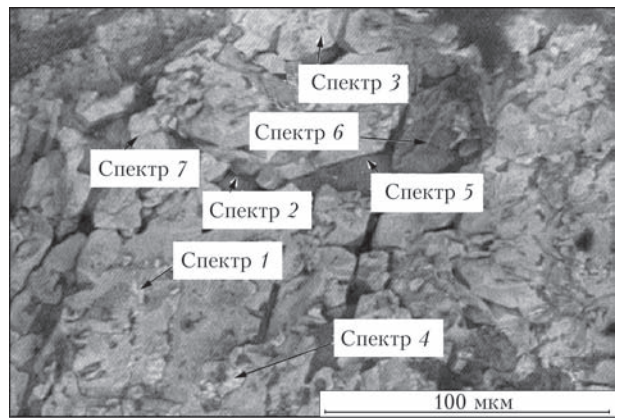
поверхности излома (рис. 4) выполняли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и микрорентгеноспектрального анализа (РЭМ) на базе аналитического комплекса, состоящего из сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF фирмы JEOL (Япония) и спектрометра с дисперсией по энергии рентгеновских квантов INCA Energy-350, фирмы Oxford Instruments (Великобритания). В таблицах рисунков представлены только основные химические элементы сплава — Mg и Ga.

Срез образца показал наличие двух типов структур: глобулярные «темные» зерна первичной структуры (рис. 3, спектры 2 и 5) с температурой кристаллизации 650 °С и межкристаллическая «светлая» эвтектика вторичной структуры с нерегулярной морфологией (рис. 3, спектры 1, 3 и 4) с температурой кристаллизации 450 °С. На рис. 5



Спектр	Mg	Ga	Фаза
мас. %			
1	46,94	50,49	
2	91,92	8,08	Mg <sub>5</sub> Ga <sub>2</sub>
3	45,12	48,97	
4	45,41	39,25	
5	87,15	6,52	

Рис. 3. Распределение химических элементов на срезе слитка (СЭМ)



Спектр	Mg	Ga	Фаза
мас. %			
1	38,03	50,17	Mg <sub>5</sub> Ga <sub>2</sub>
2	83,34	7,73	
3	26,87	62,36	Mg <sub>2</sub> Ga
4	41,72	43,99	
5	44,69	44,13	Mg <sub>5</sub> Ga <sub>2</sub>
6	77,16	16,12	
7	86,61	10,40	

Рис. 4. Распределение химических элементов на изломе слитка (СЭМ)

видно, что «светлые» области микроструктуры соответствуют областям с повышенным содержанием Ga, который преимущественно расположен по границам зерен первичной структуры. Определенный таким образом точный химический состав легированного сплава, согласно бинарной диаграмме системы Mg–Ga, соответствует интерметаллидным фазам Mg<sub>2</sub>Ga и Mg<sub>5</sub>Ga<sub>2</sub>.

Исследование механических свойств магниевого сплава МЛ4 до и после легирования проводили по стандартным методикам [6, 7]

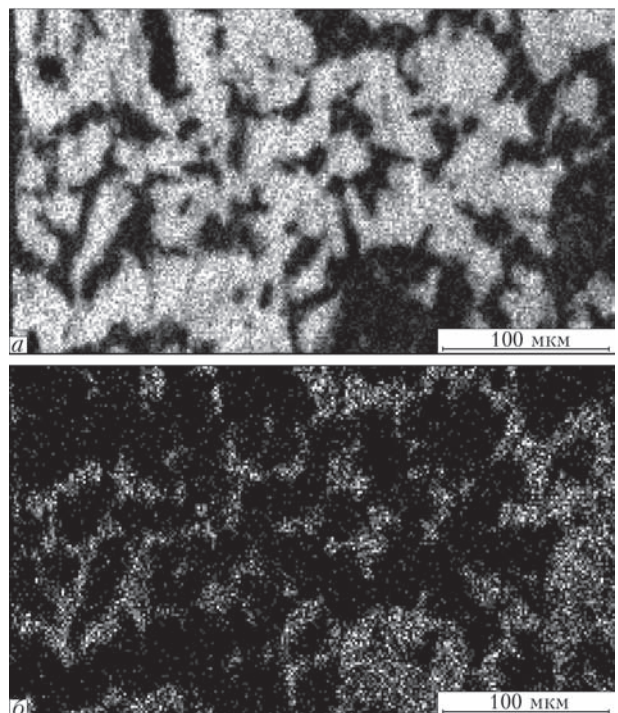


Рис. 5. Распределение Mg (а), Ga (б) в микроструктуре слитка на срезе (РЭМ)

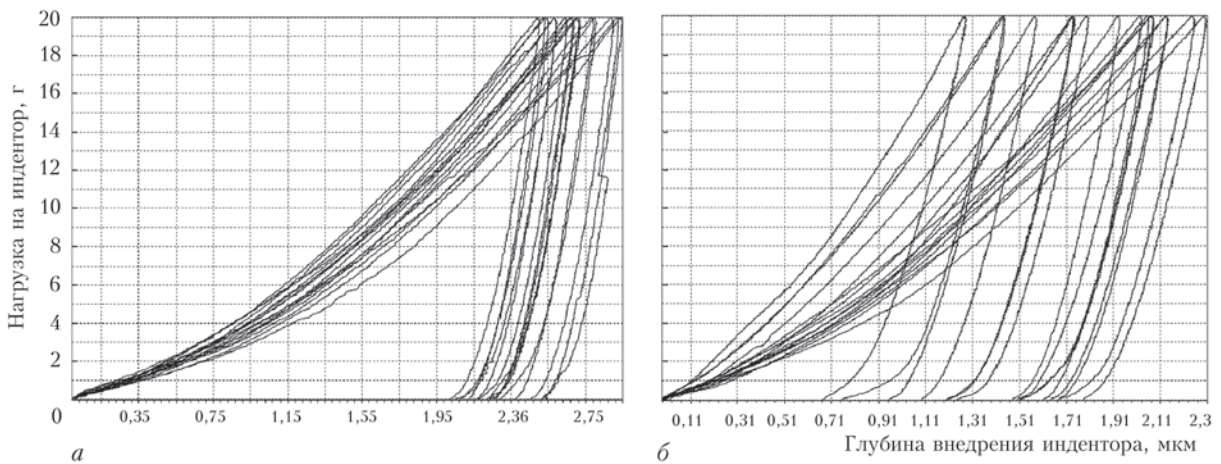


Рис. 6. Диаграммы индентирования сплава МЛ4 до легирования (а) и после (б)

согласно ISO/FDIS 14577-1:2002; «Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters» трехгранной алмазной пирамидкой Берковича [8] и с использованием прибора «Микрон-гамма». Прибор позволяет с высокой точностью определять микротвердость (по Мейеру) и модуль упругости Юнга при автоматической регистрации перемещения индентора Берковича, в зависимости от приложенной к нему нагрузки. Технические характеристики прибора: максимальная нагрузка 500 г; погрешность по нагрузке 0,001 г; погрешность по глубине внедрения индентора 5 нм; максимальная глубина индентирования 200 мкм. Результаты представлены в виде диаграмм индентирования при нагрузке 20 г с шагом 100 мкм. Подготовку образцов для индентирования проводили в соответствии со стандартной процедурой полировки легких сплавов до образования «зеркальной» поверхности и без травления.

Микромеханический тест зафиксировал значительное повышение твердости легированного сплава до 2,0...4,5 ГПа при твердости базового сплава 1,2 ГПа и повышение модуля упругости Юнга от 42 до 73...110 ГПа. Эффект упрочнения представлен диапазоном глубин меньшего внедрения индентора в легированный сплав — 1,28...2,3 мкм (рис. 6, б) при диапазоне 2,51...2,95 мкм для базового сплава (рис. 6, а).

Далее, для точной идентификации фазового состава, способствующего упрочнению магниевого сплава, было проведено рентгенофазовое исследование (рис. 7) в монохроматическом  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении на дифрактометре ДРОН-УМ1 с фокусировкой по Брэггу–Брентано. В качестве монохроматора использовали монокристалл графита, установленный на дифрагированном пучке. Дифрактограммы снимали методом шагового сканирования в интервале углов  $2\theta$  10...120°. Шаг

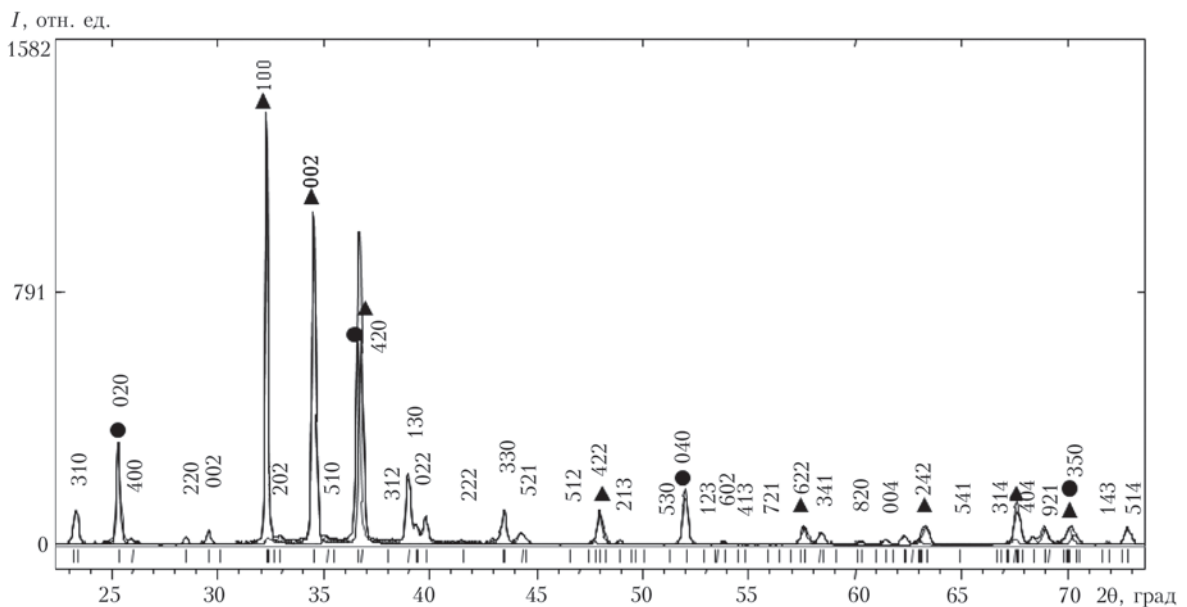


Рис. 7. Дифрактограмма легированного галлием слитка магниевого сплава Mg–Zn–Ga–Al: ● — 32,5 %  $\text{Mg}_3\text{Ga}_2$ ; ▲ — 67,5 % Mg

сканирования составлял  $0,05^\circ$ , время экспозиции в точке — 3...7 с.

Анализ дифрактограммы показал присутствие  $32,54$  мас. %  $Mg_5Ga_2$ :  $a = 13,6935$ ,  $b = 7,0220$ ,  $c = 6,0284$  и  $67,5$  мас. % Mg:  $a = 3,1941$ ,  $c = 5,1879$ .

Таким образом, можно утверждать, что упрочнение сплава МЛ4 при легировании связано с образованием фазы  $Mg_5Ga_2$ .

### Выводы

1. В результате индукционного переплава в защитной среде аргона стандартного магниевого сплава МЛ4 с добавлением технического галлия в качестве лигатуры получен слиток с химическим составом, подобным составу диффузионной зоны сварных швов, в которых галлий использовался как активатор диффузионного соединения.

2. Химический и фазовый состав слитка был исследован методами растровой электронной микроскопии и рентгенографии. Установлено, что слиток состоит из  $67,5$  мас. % магниевого матрицы и  $32,5$  мас. % фазы  $Mg_5Ga_2$ .

4. Механический тест зафиксировал интерметаллическое упрочнение — повышение модуля упругости Юнга от 42 до 73...110 ГПа и микротвердости от 1,2 до 2,0...4,5 ГПа.

1. *Khokhlov M., Ishchenko D., Khokhlova J.* Peculiarities of forming diffusion bimetallic joints of aluminum foam with a monolithic magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloy*. — Elsevier. — 2016. — Vol. 4, Is. 4. — P. 326–329.
2. *Microstructure transformation of diffusion zone in aluminum foam and monolithic magnesium alloy bimetallic joint / M. Khokhlov et al.* // *Proceedings of the 5th International Conference «Fracture mechanics of materials and structural integrity»*. 24–27 June, 2014. — Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute NASU, Ukraine. — P. 551–556.
3. *Khokhlov M., Falchenko Yu., Khokhlova J.* Microstructure and properties of joints of aluminum foam with magnesium alloys formed at up to 140 degrees Celsius // *Junior Euromat 21–25 July 2014*. — Lausanne, Switzerland. — P. 31.
4. *Khokhlov M. A., Falchenko Yu. V., Khokhlova J. A.* Peculiarities of forming diffusion bimetallic joints of aluminum foam with a monolithic magnesium alloy // *Proceedings of Cellmat*, 22–24 Oct. 2014. — Dresden, Germany. — P. 13.
5. *Khokhlov M., Khokhlova J.* Joining Al-foam with Monolithic Mg Alloys at Low Temperatures Using Ga Interlayer // 9th International conference on porous metals and metallic foams — *Metfoam*, 31 Aug. – 2 Sept. 2015. — Barcelona, Spain. — P. 79.
6. *Kazuhisa Miyoshi.* NASA/TM-2002-211497 Surface Characterization Techniques: An Overview. — 2002. — P. 12–22. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020070606.pdf>.
7. *Oliver W. C., Pharr G. M.* An improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments // *Journal Materials Research*. — 1992. — № 7. — P. 1564–1583.
8. *Nano indenters from Micro Star Technologies.* Revision 2.3. P. 9. Режим доступа: <http://www.microstartech.com/index/NANOINDENTERS.pdf>.

### ЗМІЦНЕННЯ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МЛ4 ПРИ ЛЕГУВАННІ ГАЛІЄМ

М. А. Хохлов, Ю. А. Хохлова, В. С. Синюк, Ю. О. Никитенко

Інститут електроварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, г. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі представлені результати дослідження впливу зміни хімічного і фазового складу на зміцнення магнієвого сплаву при легуванні галієм. Отриманий експериментальний злиток було досліджено методами рентгенофазового та спектрального аналізу. Показано, що внаслідок легування магнієвого сплаву галієм формується інтерметалічна фаза  $Mg_5Ga_2$ . Механічний тест методом мікроіндентування зафіксував значне збільшення модуля Юнга від 42 до 73...110 ГПа та микротвердості від 1,2 до 2,0...4,5 ГПа. Бібліогр. 8, іл. 7.

**Ключові слова:** індукційний переплав; магній; галій; легування; зміцнення; індентування

### HARDENING OF MAGNESIUM ALLOY ML4 IN ALLOYING WITH GALLIUM

M.A. Khokhlov, Yu.A. Khokhlova, V.S. Sinyuk, Yu.A. Nikitenko

E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.

11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The work presents the results of investigation of effect of changes in chemical and phase composition on hardening of magnesium alloy at its alloying with gallium. The produced experimental ingot was examined by the methods of X-ray phase and spectral analysis. It is shown that as a result of alloying of magnesium alloy with gallium the intermetallic phase  $Mg_5Ga_2$  is formed. Mechanical testing by the method of microindenting showed a significant increase in Young modulus from 42 up to 73...110 GPa and microhardness from 1.2 up to 2.0...4.5 GPa. Ref. 8, Figures 7.

**Key words:** induction remelting; magnesium; gallium; alloying; hardening; indenting

Поступила 04.11.2016