

- Шаломєєв В. А. д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: shalomeev@radiocom.net.ua;
- Лук'яненко О. С. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: saneklukyanyenko@gmail.com

ВПЛИВ АЛЮМІНІЮ НА ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ФАЗИ В МАГНІЄВИХ СПЛАВАХ

Мета роботи. Дослідження впливу легування алюмінієм на структуроутворення, механічні властивості і жароміцність магнієвих сплавів.

Методи дослідження. Використовувалися методи металографічного та мікрорентгеноспектрального аналізу. Визначення механічних властивостей та жароміцності.

Отримані результати. Досліджено закономірності впливу легування алюмінієм на формування зміцнювальної фази в магнієвих сплавах. Показано, що підвищення концентрації алюмінію в магнієвому сплаві сприяє подрібненню макро- і мікроструктури металу (зменшенню розміру зерна та відстанню між дендритними осями другого порядку), а також збільшує кількість інтерметалідної фази. Встановлено позитивний вплив присадок алюмінію на механічні властивості і жароміцність литого металу.

Визначено оптимальний рівень легування магнієвого сплаву алюмінієм (близько 7,7 %), що забезпечує достатній рівень механічних властивостей та жароміцності.

Наукова новизна. На основі регресійного аналізу експериментальних даних отримано емпіричні рівняння, що описують залежності розміру макро- та мікрозерна від концентрації алюмінію в магнієвих сплавах. Показано, що оптимальний вміст алюмінію в магнієвому сплаві в кількості ~ 7,7 % забезпечує найкраще поєднання механічних властивостей (а саме достатньо високу міцність та найвищі показники пластичності) і жароміцності.

Практична цінність. Встановлено, що легування магнієвих сплавів алюмінієм є перспективним для покращення структури і підвищення механічних властивостей та жароміцності литого металу. Даний ефект дозволяє суттєво розширити область застосування магнієвих сплавів у машинобудуванні та підвищити експлуатаційні характеристики різноманітного обладнання.

Ключові слова: магнієвий сплав, легування, алюміній, зміцнювальна фаза, мікрозерно, інтерметаліди, механічні властивості, жароміцність.

Магнієві сплави, що мають низьку питому вагу, достатньо високий рівень властивостей і добре оброблюються, знаходять широке застосування в різноманітних сферах машинобудування. Як правило, однотипні литі деталі з магнієвих сплавів на 25...30 % легше за алюмінієві, в чотири рази легші за сталеві та в двічі у порівнянні з титановими [1, 2]. Застосування виливок з магнієвих сплавів дозволяє суттєво знизити масу агрегатів, що забезпечує збільшення ККД, підвищує швидкість, корисне навантаження, дальність пробігу та зменшення витрат палива [3, 4].

Важливою особливістю магнієвих сплавів є здатність добре опиратися ударним навантаженням. Це пояснюється їх низьким модулем пружності. Магнієві сплави добре поглинають вібрацію. Їх питома вібраційна міцність в десятки разів більше, ніж у дюралюмінію чи сталі. Висока демпфуюча здатність магнієвих сплавів дозволяє широко використовувати їх у відповідальних конструкціях, що працюють в умовах віброударних навантажень. Магнієві сплави володіють високою теплопоглинаючою здатністю. За температуро-провідністю вони перевершують більшість конструкційних матеріалів. Тому в умовах передачі однакової кількості тепла виріб з магнієвого сплаву нагрівається значно менше, ніж вироби з інших матеріалів, що

забезпечує в них порівняно невеликі термічні навантаження [5].

При від'ємних температурах не відбувається різкого окрихнення магнієвих сплавів, а лише незначне зменшення ударної в'язкості та відносного видовження, що робить магнієві сплави особливо корисними для роботи при низьких температурах.

Зростаючі експлуатаційні надійність і довговічність машин і механізмів висувають підвищені вимоги до властивостей виливків з магнієвих сплавів. Тому забезпечення підвищених фізико-механічних і спеціальних властивостей виливків з магнієвих сплавів є актуальною задачею [6].

Покращення властивостей виливків з магнієвих сплавів досягається при легуванні за рахунок оптимального поєднання різноманітних механізмів зміцнення [7]. Перш за все це – утворення твердих розчинів з цілеспрямованим зміцненням кристалічної ґратки розчинника атомами елементів, що розчинюються. Важливу роль відіграють перешкоди, що гальмують рух: субмікроскопічні виділення фаз, що виникають в процесі взаємодії елементів сплаву з елементами, що вводяться [8].

Дешевим і доступним елементом для легування магнієвих сплавів є алюміній, котрий не тільки утворює твердий розчин у магнії, але й може брати

участь в утворенні зміцнювальних інтерметалідних фаз [9]. Тому вивчення впливу алюмінію на структуру і властивості магнієвих сплавів представляє як теоретичний, так і практичний інтерес.

Досліджували вплив алюмінію на структуроутворення, механічні властивості та довготривалу міцність при підвищених температурах магнієвих сплавів.

Плавки проводили в індукційній тигельній печі ППМ-500. В якості шихтових матеріалів використовували технічно чистий магній МГ 90 (99,9 % Mg) і алюміній первинний А5 (99,6 % Al). Після розплавлення магнію в нього вводили зростаючі присадки алюмінію (0; 0,1; 1,0; 8,0; 10,0 % Al – за розрахунком) і заливали у пісчаноглинисті форми для отримання стандартних зразків с робочим діаметром 12 мм. Зразки для механічних випробувань проходили термічну обробку в печах типу Бельв'ю и ПАП-4М за режимом: (гомогенізація при температурі 415 °С (витримка 24 години), охолодження на повітрі + старіння при температурі 215 °С (витримка 10 години), охолодження на повітрі).

Границя міцності і відносне видовження зразків визначали на розривній машині Р5 при кімнатній температурі. Довготривалу міцність при температурі 150 °С і навантаженні 80 МПа визначали на розривній машині АІМА 5-2 на зразках з робочим діаметром 5 мм за ГОСТ 10145-81.

Мікроструктуру виливків визначали методом світлової мікроскопії («Neophot 32») на термічно оброблених зразках після травлення реактивом, що складається з 1 % азотної кислоти, 20 % оцетної кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколя.

Мікротвердість структурних складових сплаву визначали на мікротвердомірі фірми «Buehler» при навантаженні 0,1 Н. Мікрорентгеноспектральний аналіз структурних складових сплаву проводили на електронному мікроскопі «JSM-6360LA».

Макрофрактографічне дослідження зламів литих зразків із чистого магнію показало наявність в структурі грубої крупнокристалічної будови (рис. 1а). З підвищенням вмісту алюмінію в сплаві структура помітно подрібнилась (рис. 1б-д).

Мікроструктура чистого магнію мала однорідну будову, в якій при травленні виявлялись міждендритні ділянки дрібнозернистого виду (рис. 2а).

Збільшення вмісту алюмінію в магнії сприяло утворенню інтерметалідної фази. До того ж, з підвищенням концентрації алюмінію в сплаві кількість інтерметалідних часток збільшувалась (рис. 2б-д), а розмір мікрозерна зменшувався (табл. 1). В сплавах, що містили 7,7 % Al і більше, крім одиничних інтерметалідів, була присутня евтектика $\delta+\gamma$ (рис. 2з-д).

Регресійний аналіз отриманих результатів дозволив отримати емпіричні рівняння залежностей, що описують залежності розміру мікрозерна (1) та відстані між осями дендритів 2-го порядку (2) від концентрації алюмінію в магнії:

$$d = 274,7945 - 14,0560 * [Al], \text{ мкм} \quad (1)$$

$$\tau = 39,2679 - 1,8285 * [Al], \text{ мкм} \quad (2)$$

Мікрорентгеноспектральний аналіз евтектичної фази (рис. 3) в сплаві, що містить 7,7 % Al показав, що δ -фаза (ділянки 002 и 003) являють собою ~ 6...10 % твердий розчин алюмінію в магнії, а евтектична ($\delta+\gamma$)-фаза (ділянка 004) складається з магнію (86,52 %) і алюмінію (13,48 %).

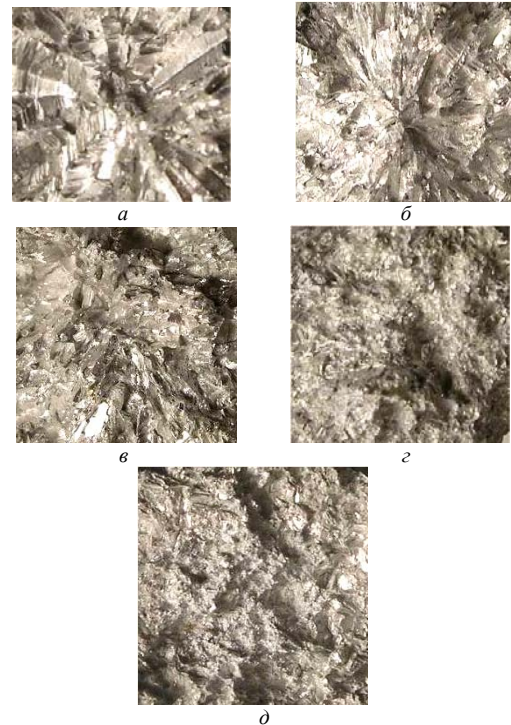


Рис. 1. Будова зламів розривних зразків з магнієвого сплаву, $\times 5$: а – 99,9 % Mg; б – 0,12 % Al; в – 1,16 % Al; г – 7,7 % Al; д – 9,8 % Al

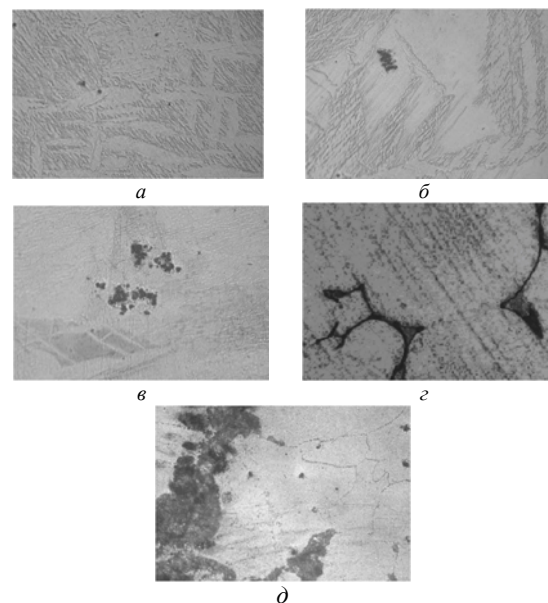


Рис. 2. Мікроструктура литого магнієвого сплаву, $\times 500$: а – 99,9 % Mg; б – 0,12 % Al; в – 1,16 % Al; г – 7,7 % Al; д – 9,8 % Al

Мікрорентгеноспектральний аналіз евтектичної фази (рис. 3) в сплаві, що містить 7,7 % Al показав, що δ - фаза (ділянки 002 и 003) являють собою ~ 6...10 % твердий розчин алюмінію в магнії, а евтектична ($\delta+\gamma$)- фаза (ділянка 004) складається з магнію (86,52 %) и алюмінію (13,48 %).

Дослідження мікроструктури зразків після довготривалих випробувань при температурі 150 °С показало, що в зразках з алюмінієм спостерігалось додаткове виділення дрібнодисперсних часток інтерметалідної фази, що сприяло зміцненню матриці і підвищенню жароміцності сплаву. При цьому, в робочій частині зразків, що піддавалися деформації, була більша кількість інтерметалідів і більш дрібне зерно в порівнянні з його неробочою частиною (рис. 3).

Стандартна термообробка і довготривалі випробування майже не вплинули на мікротвердість чистого магнію і сплаву з 0,12 % Al. Подальше

підвищення вмісту алюмінію сприяло збільшенню мікротвердості матриці. Більш високі значення мікротвердості були отримані в робочій частині зразків, що піддавалися довготривалим випробуванням, за рахунок зміцнення додатково виділеною інтерметалідною фазою.

Збільшення вмісту алюмінію в сплавах магнію, як до, так і після їх термічної обробки, сприяло підвищенню механічних і жароміцних властивостей. При цьому, гранця міцності помітно зросла при незначному покращенню пластичності. Максимальні значення пластичності сплаву досягалися при вмісті алюмінію в сплаві 7,7 %. Подальше збільшення його вмісту сприяло деякому зменшенню пластичності. Жароміцність магнієвого сплаву збільшувалася з підвищенням вмісту алюмінію більше 1,16 % (табл. 2).

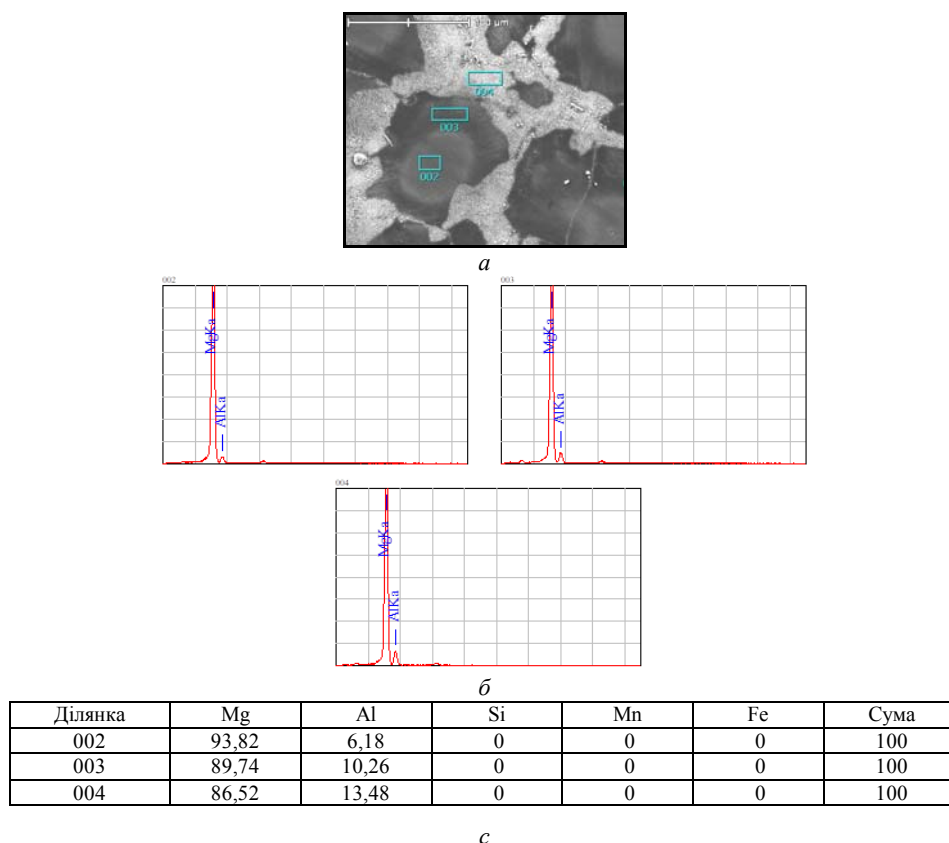


Рис 3. Результати МРСА магнієвого сплаву с 7,7 % Al: а – місця аналізу; б – спектрограми місць, що аналізуються; с – хімічний склад відмічених ділянок (мас. %)

Таблиця 1 – Характеристики структурних складових сплавів системи Mg-Al

Вміст Al, мас. %	Розмір мікро-зерна, мкм	Відстань між осями дендритів 2-го порядку, мкм	Мікротвердість матриці HV, МПа		
			після термообробки	після випробувань на довготривалу міцність, τ_{150}^{80}	
				неробоча. зона	робоча зона
-	310	44	524,3	542,4	542,4
0,12	280	38	562,0	572,0	602,8
1,16	210	33	636,7	737,6	766,7
7,7	170	25	782,9	866,1	923,2
9,8	140	22	1156,5	1186,3	1221,6

Примітка. В таблиці приведені середні значення.

Таблиця 2 – Механічні властивості і жароміцність сплавів системи Mg-Al

Вміст Al, мас. %	Механічні властивості				τ_{150}^{80} , час
	до термообробки		після термообробки		
	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	
-	105,4	1,5	107,4	1,8	0
0,12	107,5	1,8	111,5	2,1	0
1,16	118,5	2,0	119,4	2,3	6,2
7,7	136,6	2,4	191,2	2,6	129,6
9,8	166,3	2,0	233,2	2,2	140,5

Примітка. В таблиці приведені середні значення.

Таким чином, легування магнієвих сплавів алюмінієм є перспективним для покращення структури і підвищення механічних властивостей і жароміцності литва. Це дозволяє розширити область використання магнієвих сплавів в машинобудуванні і підвищити експлуатаційні характеристики різноманітного обладнання.

Висновки

1. Легування алюмінієм магнієвих сплавів сприяє подрібненню макро- і мікрозерна та підвищенню мікротвердості структурних складових. При цьому, інтенсивність подрібнення зерна збільшується з підвищенням вмісту алюмінію в основі сплаву.

2. На основі регресійного аналізу отримано емпіричні рівняння, що описують залежності параметрів макро- та мікроструктури від концентрації алюмінію в сплаві.

3. Встановлено позитивний вплив присадок алюмінію на механічні властивості і жароміцність магнієвого литва. При цьому, оптимальний вміст алюмінію в магнієвому сплаві у кількості 7,7 % забезпечує найкраще поєднання механічних властивостей і жароміцності.

4. Розробка нових сплавів системи Mg-Al є перспективним напрямком покращення структури і підвищення механічних властивостей і жароміцності литва, що розширює його область застосування і робить перспективним конструкційним матеріалом для машинобудування.

Список литературы

1. Поліпшені магнієві сплави для деталей ГТД / В. О. Богуслаєв, П. Д. Жеманюк, Е. І. Цивірко та ін. // Колективна монографія під ред. В. О. Богуслаєва, Запоріжжя : Мотор Сич, 2016. – 259 с.

2. Development of new casting magnesium based alloys with increased mechanical properties / V. Shalomееv, E. Tsivirco, Y. Vnukov and etc. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 4/1 (82). – P. 4–10.

3. Microstructure and Properties of Selected Magnesium-Aluminum Alloys Prepared for SPD Processing Technology / L. Cizek, S. Ruzs, O. Hilser and etc. // The Journal of Institute of Metallurgy and Materials Science and Committee on Metallurgy of Polish Academy of Sciences. – Vol. 62, Issue 4. – P. 2365–2370.

1. Effect of erbium on microstructures and properties of Mg-Al intermetallic / Yonggang L. I. Yinghui Wei, Lifeng Hou and etc. // Journal of Rare Earths. – 2014. – Vol. 32, Issue 11. – P. 1064–1072.

2. Fei Chen. Structure and Properties of MAO Coating Prepared on Mg-Li Alloy / Fei Chen, Yulin Zhang, You Zhang // International Journal of electrochemical science. – 2017. – № 12. – P. 6081–6091.

3. Шаломеев В. А. Структура та властивості магнієвого сплаву МЛ5 з легкоплавкими металами / В. А. Шаломеев, Е. І. Цивірко, Ю. О. Зеленюк // Вісник двигунобудування. – 2014. – № 1. – С. 131–135.

4. Zhou W. Hot cracking in tungsten inert gas welding of magnesium alloy AZ91D / W. Zhou, T. Z. Long, C. K. Mark // Materials Science and Technology. – 2007. – Vol. 23. – № 11. – P. 1294–1299.

5. Jingfeng Wang. Optimization of mechanical and damping properties of Mg-0.6Zr alloy by different extrusion processing / Jingfeng Wang, Zhongshan Wu, Shan Gao // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – № 3(1). – P. 79–85.

6. Kai Wen. Effect of microstructure evolution on mechanical property of extruded Mg-12Gd-2Er-1Zn-0.6Zr alloys / Kai Wen, Ke Liu, Zhaohui Wang // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – № 3(1). – P. 1–94.

Одержано 12.05.2021

Після доробки 19.05.2021

Шаломеев В. А. Лукьяненко А. С. Влияние алюминия на формировании упрочняющей фазы в магниевых сплавах

Цель работы. Исследование влияния легирования алюминием на структурообразование, механические свойства и жаропрочность магниевых сплавов

Методы исследования. Использовались методы металлографического и микрорентгеноспектрального анализа. Определение механических свойств и жаропрочности.

Полученные результаты. Исследовано закономерности влияния легирования алюминием на формирование упрочняющей фазы в магниевых сплавах. Показано, что повышение концентрации алюминия в магниевом сплаве способствует измельчению макро- и микроструктуры металла (уменьшает размера зерна и расстояние между дендритными осям второго порядка), а так же увеличивает количество интерметаллидной фазы. Установлено положительное влияние присадок алюминия на механические свойства и жаропрочность литого металла.

Определен оптимальный уровень легирования магниевого сплава алюминием (около 7,7 %), что обеспечивает достаточный уровень механических свойств и жаропрочности.

Научная новизна. На основании регрессионного анализа экспериментальных данных получены эмпирические уравнения, которые описывают зависимости размера макро- и микрозерна от концентрации алюминия в магниевых сплавах. Показано, что оптимальное содержание алюминия в магниевом сплаве в количестве ~ 7,7 % обеспечивает лучшее сочетание механических свойств (а именно достаточно высокую прочность и самые высокие показатели пластичности) и жаропрочности.

Практическая ценность. Установлено, что легирование магниевых сплавов алюминием является перспективным для улучшения структуры и повышения механических свойств и жаропрочности литого металла. Данный эффект позволяет существенно расширить область применения магниевых сплавов в машиностроении и повысить эксплуатационные характеристики различного оборудования.

Ключевые слова: магниевый сплав, легирование, алюминий, упрочняющая фаза, микрозерно, интерметаллиды, механические свойства, жаропрочность.

Shalomeev V. Lukianenko O. The influence of aluminum on the formation of the hardening phase in magnesium alloys

Purpose. Study of the effect of alloying with aluminum on structure formation, mechanical properties and heat resistance of magnesium alloys

Research methods. Methods of metallographic and micro X-ray spectral analysis. Determination of mechanical properties and heat resistance.

Results. The regularities of the influence of alloying with aluminum on the formation of the hardening phase in magnesium alloys have been investigated. It is shown that an increase in the concentration of aluminum in magnesium alloy promotes refinement of the macro- and microstructure of the metal (reduces the grain size and the distance between the second-order dendritic axes) and also increases the amount of intermetallic phase. The positive effect of aluminum additives on the mechanical properties and heat resistance of cast metal has been established.

The optimal level of alloying with aluminum (about 7,7 %) has been determined, which ensures a sufficient level of mechanical properties and heat resistance.

Scientific novelty. Based on the regression analysis of the experimental data, empirical equations were obtained that describe the dependences of the size of macro- and micrograins on the concentration of aluminum in magnesium alloys. It is shown that the optimal aluminum content in the magnesium alloy in the amount of ~ 7,7 % provides the best combination of mechanical properties (a sufficiently high strength and the highest plasticity) and heat resistance

Practical value. It has been established that alloying magnesium alloys with aluminum is promising for improving the structure and increasing the mechanical properties and heat resistance of cast metal. This effect makes it possible to significantly expand the field of application of magnesium alloys in mechanical engineering and improve the performance of various equipment.

Key words: magnesium alloy, alloying, aluminum, hardening phase, micrograin, intermetallic compounds, mechanical properties, heat resistance.