

УДК 669.2/.8-034.7

doi: 10.32620/akt.2020.8.17

С. Г. МАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, В. В. ЛУКИНОВ<sup>1</sup>, В. В. КЛОЧИХИН<sup>1</sup>,  
В. А. ШАЛОМЕЕВ<sup>2</sup>, С. П. ШЕЙКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО Мотор Сич, Запорожье, Украина

<sup>2</sup> Национальный Университет «Запорожская Политехника», Запорожье, Украина

<sup>3</sup> Запорожский Национальный Университет, Запорожье, Украина

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ15 НАНОПОРОШКОМ УГЛЕРОДА

Развитие современной авиакосмической техники требует постоянного повышения эксплуатационных характеристик, поэтому, применение усовершенствованных легких материалов становится все более актуальным. Магниевого сплавы являются одними из наиболее легких конструкционных материалов, поэтому их применение в силовых установках позволяет повысить эксплуатационные характеристики, такие, как удельная мощность и топливная экономичность. Особенно актуальным является повышение физико-механических свойств магниевых сплавов системы Mg-Al-Zn за счет управления их структурными характеристиками посредством модифицирования. Предложена высокоэффективная малозатратная технология модифицирования магниевых сплавов системы МЛ15 микродобавками нанопорошка технически чистого углерода. Проведено сравнительное металлографическое исследование материала образцов с возрастающими присадками нанопорошка углерода (0,001 %, 0,005 %, 0,01 %, 0,05 %, 0,1 % мас.). Показано, что оптимальная присадка в расплав наномодификатора в количестве 0,005 % по массе способствует измельчению макро- и микроструктуры металла, повышает весь комплекс его механических свойств. Введение в магниевый сплав углеродного наномодификатора способствовало измельчению эвтектоида. Размер  $[\delta+\gamma]$  - фазы и величина микрозерна уменьшились приблизительно в 1,5 раза. Обнаружено, что модифицирование структуры металла углеродными наночастицами эффективно в узком интервале их концентрации в расплаве. В частности, введение в расплав присадки нанопорошка в количестве 0,1% мас. и более приводило к образованию внутренних дефектов в металле – микрорыхлот и пленочных загрязнений. Присадки нанопорошка углерода в сплав МЛ15 способствовали повышению его пластических свойств. При этом, присадки модификатора в количестве 0,005...0,01 % мас. в сплав обеспечивали максимальное (~ 2 раза) повышение пластических свойств металла и незначительное увеличение уровня его прочности. Дальнейшее увеличение количества вводимого модификатора приводило к некоторому снижению механических свойств сплава. Таким образом, модифицирование магниевых сплавов системы Mg-Al-Zn микродобавками углеродных наночастиц является перспективным методом повышения физико-механических свойств материала в условиях промышленного производства легких конструкций ответственного назначения для авиакосмической техники.

**Ключевые слова:** модифицирование; магниевый сплав; углеродные наночастицы; центры кристаллизации; микроструктура; макрозерно; эвтектоид ( $\delta+\gamma$ ).

### Введение

На современном этапе развития мировой авиакосмической промышленности ставится задача постоянного улучшения весовых характеристик летательных аппаратов, топливной экономичности, повышения эксплуатационной надежности, увеличения ресурса и уменьшения эмиссии вредных веществ [1].

Литейные магниевые сплавы находят широкое применение в авиадвигателестроении и вертолетной промышленности благодаря комплексу ценных свойств - малой плотности  $\rho = 1,8-1,9 \text{ г/см}^3$ , высокой удельной прочности Бв/д, способности поглощения энергии удара и вибрационных колебаний [2].

Высокопрочные сплавы системы Mg-Al-Zn получили наиболее широкое распространение для ли-

тая фасонных нагруженных отливок, длительно работающих при температуре до 110...120 °С. Между тем, ограниченные свойства ползучести, пластичности, а также коррозионная стойкость этих сплавов сдерживают их широкое применение. Одной из характерных особенностей сплавов системы Mg-Al-Zn является микрорыхлота, в основном усадочного характера, которая может значительно усиливаться при выделении растворенного водорода в процессе кристаллизации отливки и приводить к снижению прочности [3].

Одним из перспективных направлений повышения механических свойств и качества магниевых сплавов является модифицирование расплава [4]. Помимо измельчения зерна, модифицирование позволяет улучшить структурную однородность магниевых

вых сплавов, что способствует повышению коррозионной стойкости материала за счет более равномерного распределения фаз по границам зерна. Несмотря на то, что в мировой индустрии магниевых сплавов в последние годы проводится большое число работ по изучению процессов модифицирования, по-прежнему отсутствует предложение модификаторов магниевых сплавов системы Mg-Al-Zn, обеспечивающих устойчивый эффект измельчения зерна и доступного для применения в промышленных масштабах [5], а одной из главных современных проблем металлургии литейных магниевых сплавов является отсутствие четкого объяснения механизма измельчения зерна сплавов данной группы [6 - 9].

## 1. Постановка задачи

Задача настоящей работы заключается в разработке метода модифицирования литейных магниевых сплавов с содержанием алюминия, который может быть использован в промышленных условиях для изготовления высококачественных отливок нагруженных деталей авиационных двигателей и корпусов агрегатов вертолетных трансмиссий (редукторов).

Основными требованиями к модификаторам магниевых сплавов являются: способность образовывать нерастворимые центры кристаллизации, стабильный эффект модифицирования, низкая стоимость и недефицитность [10 - 12]. Одним из материалов, подходящих для этих условий, являются нанопорошки углерода, главным преимуществом при использовании которых является их способность не загрязнять металл оксидными включениями и продуктами реакции при контакте с расплавом [13 - 15]. Поэтому, представляет интерес разработка технологии модифицирования нанопорошками углерода магниевых сплавов, обеспечивающая данные требования.

## 2. Результаты

В качестве углеродного модификатора использовали высокодисперсный порошок высокой текучести, состоящий из пластинок графита (99,98 % C), которые имеют номинальную площадь поверхности до 300 м<sup>2</sup>/г и индекс толщины пластинок 8...9 нм, соответствующих приблизительно числу слоев графена (рис. 1).

Магниевый сплав МЛ5 выплавляли в индукционной тигельной печи типа ИПМ-500 по серийной технологии. Рафинирование сплава проводили в раздаточной печи с порционным отбором расплава, в который вводили возрастающие присадки нанопорошка углерода (0,001 %, 0,005 %, 0,01 %, 0,05 %, 0,1 % мас.). Модифицирующие присадки готовили методом одноосного прессования смеси различных составов порошка магния и нанопорошка углерода. Заливали стандартные образцы (Тзал.= 750°C) для механических испытаний в песчано-глинистую форму. Образцы проходили термическую обработку по режиму Т6: нагрев до 415±5 °С, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе и старение при 200±5 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе.

0,1 % мас.). Модифицирующие присадки готовили методом одноосного прессования смеси различных составов порошка магния и нанопорошка углерода. Заливали стандартные образцы (Тзал.= 750°C) для механических испытаний в песчано-глинистую форму. Образцы проходили термическую обработку по режиму Т6: нагрев до 415±5 °С, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе и старение при 200±5 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе.

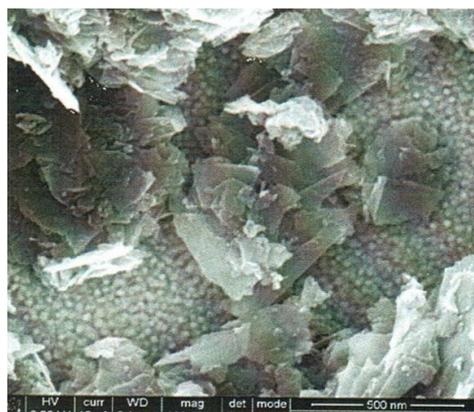


Рис. 1. Наноструктура высокодисперсного графитового порошка



Рис. 2. Микропористость и пленки в образцах сплава МЛ5 с присадкой нанопорошка углерода 0,1 %, x200

Временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ) и относительное удлинение ( $\delta$ ) образцов с рабочим диаметром 12 мм определяли на разрывной машине Р5 при комнатной температуре.

Микроструктуру отливок изучали методом световой микроскопии («Neophot 32») на термически обработанных образцах после травления реактивом, состоящем из 1 % азотной кислоты, 20 % уксусной кислоты, 19 % дистиллированной воды, 60 % этиленгликоля.

Микротвердость структурных составляющих сплава определяли на микротвердомере фирмы «Buehler» при нагрузке 0,1 Н. Химический состав сплава различных вариантов модифицирования удо-

влетворял требованиям ГОСТ 2856-79 и по содержанию основных элементов находился примерно на одном уровне.

Макрофрактографический анализ изломов образцов исследуемого металла показал, что присадки нанопорошка углерода в расплав способствовали измельчению макрозерна сплава, характер излома становился матовым мелкокристаллическим. Однако, присадки нанопорошка в количестве 0,1 % мас. и более приводили к образованию микрорыхлот и пленочных загрязнений (рис. 2).

Металлографическим исследованием сплава МЛ15, полученного по стандартной технологии, установлено, что основными структурными составляющими данного сплава являлись:  $\delta$ -твердый раствор, эвтектоид ( $\delta+\gamma$ ) и интерметаллиды  $\gamma$ . Эвтектоидная фаза была сосредоточена на границах зерен, интерметаллидная фаза  $\gamma$  выделялась в виде частиц глобулярной формы (рис. 3, а).

Введение в магниевый сплав углеродного наномодификатора способствовало измельчению эвтектоида (рис. 3, б, в). Размер [ $\delta+\gamma$ ] - фазы и величина макрозерна уменьшились в  $\sim 1,5$  раза (табл. 1).

Установлено, что микротвердость эвтектоидных выделений литого сплава была в  $\sim 2,5$  раза выше значений матричного  $\delta$ -твердого раствора. В термообработанном сплаве наблюдалось увеличение микротвердости матрицы и снижение значений твердости эвтектоида  $\delta+\gamma$ , что свидетельствует о повышении однородности термообработанного сплава. При этом, соотношение значений микротвердости матрицы к эвтектоиду составляло примерно 1:1,5. Присадка в сплав МЛ15 нанопорошка углерода в исследуемых пределах практически не влияла на микротвердость его структурных составляющих.

Присадки нанопорошка углерода в сплав МЛ15 способствовали повышению его пластических свойств (табл. 2). При этом, присадки модификатора в количестве 0,005...0,01 % мас. в сплав обеспечивали максимальное ( $\sim 2$  раза) повышение пластических свойств металла и незначительное увеличение уровня его прочности. Дальнейшее увеличение количества вводимого модификатора приводило к некоторому снижению механических свойств сплава.

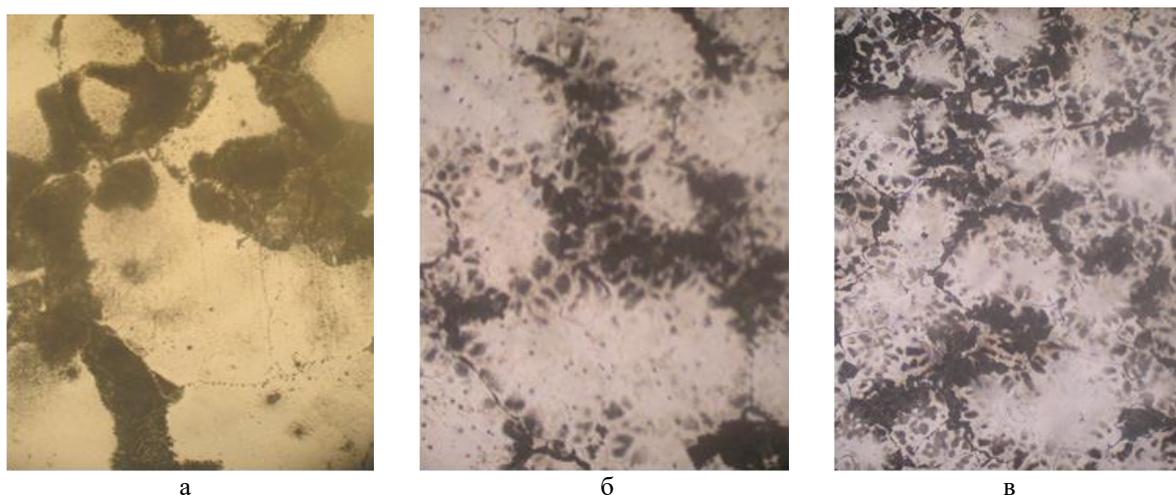


Рис. 3. Микроструктура сплава МЛ15 после термообработки, x500: а – исходный сплав; б – присадка 0,005 % С; в – присадка 0,01 % С

Таблица 1

Размеры структурных составляющих в образцах из сплава МЛ15 с различными присадками нанопорошка углерода

Присадки нанопорошка углерода, %	Расстояние между осями дендритов 2 <sup>го</sup> порядка, мкм	Размер макрозерна, мкм	Размер эвтектоида, мкм
без модиф.	50...55	210...270	150...320
0,001	38...45	100...160	60...250
0,005	35...42	80...150	60...240
0,01	33...41	70...150	50...220
0,05	34...41	70...150	50...200
0,1	34...40	70...150	50...180

Таблица 2

Механические свойства \*) образцов из сплава МЛ15

Присадка модификатора, % масс.	Механические свойства			
	без термообработки		после термообработки	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
без модифици- рования	160	1,8	220	2,7
0,001	162	3,1	222	4,2
0,005	165	3,5	230	5,3
0,01	164	3,8	228	4,8
0,05	161	3,6	215	4,0
0,1	155	2,5	211	3,6

Примечание: \*) – средние значения

### Выводы

Предложенная методика модифицирования сплава МЛ15 нанопорошками углерода в количестве 0,005...0,01 % обеспечивает измельчение макро- и микроструктуры, уменьшение размеров эвтектоида и, как следствие, повышает его пластичность с сохранением прочностных характеристик.

Термическая обработка способствует повышению однородности сплава вследствие перераспределения элементов между осями и межосными пространствами дендритов и приводит к выравниванию свойств по сечению отливки.

### Литература

1. Магниево-алюминиевые сплавы повышенного качества для авиационного машиностроения [Текст] : пер. с укр. / В. А. Богуслаев, П. Д. Жеманюк, С. Б. Беликов, Э. И. Цивирко, В. А. Шаломеев, В. В. Ключихин, В. В. Лукинов, В. Н. Черный. – Запорожье : изд. АО «Мотор Сич», 2016. – 207 с.

2. Магниево-алюминиевые сплавы. Металловедение магния и его сплавов. Области применения [Текст] : справочник Ч. 1. / М. Б. Альтман [и др.]. – М. : «Металлургия», 1978. – 232 с.

3. Полмеар, Я. Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов [Текст] : пер. с англ. / Я. Полмеар. – М. : Техносфера, 2008. – 464 с.

4. Magnesium casting alloys with increased level of properties for mechanical engineering [Text] / V. A. Shalomeev, E. I. Tsivirko, Y. N. Vnukov, M. M. Zinchenko // Cambridge Journal of Education and Science. – Cambridge University Press, 2016. – Vol. III, no. 1(15). – P. 608-615.

5. Grain refining mechanisms in magnesium alloys – An overview [Text] / D. Vinotha, K. Raghukandan, U. T. S. Pillai, B. C. Pai // Transactions of the Indian Institute of Metals. – December 2009. – Vol. 62, Iss. 6. – P. 521-532.

6. Grain refinement of magnesium alloys: a review of recent research, theoretical developments and their application [Text] / D. H. StJohn, M. A. Easton, M. Qian, J. A. Taylor // Metallurgical and Materials Transactions A. – July 2013. – Vol. 44A. – P. 2935-2949.

7. Karakulak, E. A review: Past, present and future of grain refining of magnesium castings [Text] / Erdem Karakulak // Journal of Magnesium and Alloys. – 2019. – No. 7. – P. 355-369.

8. Effect of Carbon Powder on Grain Refinement of an AZ91E Magnesium Alloy [Text] / Eiji Yano, Yousuke Tamura, Tetsuichi Motegi and Eiichiro Sato // Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44, No. 1. – P. 107-110.

9. A brief history of the development of grain refinement technology for cast magnesium alloys [Text] / D. H. StJohn, P. Cao, M. Qian, M. A. Easton // Proceedings of a Symposium Magnesium Technology 2013 TMS 2013 Annual Meeting & Exhibition. San Antonio, Texas, USA March 3-7, 2013. – P. 3-8.

10. Development of new casting magnesium based alloys with increased mechanical properties [Text] / V. Shalomeev, E. Tsivirko, Y. Vnukov, K. Osadchaya, S. Makovskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 4, No. 1(82). – P. 4-10. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.73384.

11. Influence of rolling directions on microstructure, mechanical properties and anisotropy of Mg–5Li–1Al–0.5Y alloy [Text] / T. Wang, T. Zhu, J. Sun, R. Wu, M. Zhang // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 345-351.

12. Jia, H. Influence of solution treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of Mg–4Zn alloy [Text] / H. Jia, X. Feng, Y. Yang // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 247-252.

13. Effect of temperature on the mechanical abnormality of the quasicrystal reinforced Mg–4 % Li– 6% Zn–1.2 % Y alloy [Text] / C. Q. Lia, D. K. Xua, T. T. Zua, E. H. Hana, L. Wangb // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – Vol. 3, Iss. 2. – P. 106-111.

14. Effects of Ti addition on the microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Zr–Ca alloys [Text] / J. Chen, Y. Sun, J. Zhang, W. Cheng, X. Niu, C. Xu // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – Vol. 3, Iss. 2. – P. 151-157.

15. Phase stability, electronic, elastic and thermodynamic properties of Al–Re intermetallics in Mg–Al–Re alloy: A first principles study [Text] / H. L. Chen, L. Lin, P. L. Mao, Z. Liu // Journal of Magnesium and Alloys. – 2015. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 197-202.

### References

1. Boguslayev, V.A., Zhemanyuk, P.D., Belikov, S.B., Zvirko, E.I., Shalomeyev, V.A., Klochykhin, V.V., Lukinov, V.V. Magniyevye splavy povyshennogo kachestva dlya aviatsyonnogo mashynostroyeniya [Magnesium alloys of improved quality for aeronautical

engineering]. Zaporozhye, JSC Motor Sich Publ., 2016. 207 p.

2. Al'tman, M. B. et al. *Magnievye splavy. Metallovedenie magnija i ego splavov. Oblasti primeneniya*. Spravochnik Ch.1. [Magnesium alloys. Physical metallurgy of magnesium alloys and its alloys. Areas of Application. Handbook, Part 1]. Moscow, «Metallurgija» Publ., 1978. 232 p.

3. Polmear, Ja. *Legkie splavy: ot tradicionnyh do nanokristallov*: per. s angl. [Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals. Translated from English]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2008. 464 p.

4. Shalomoev, V. A. et al. Magnesium casting alloys with increased level of properties for mechanical engineering. *Cambridge Journal of Education and Science*, 2016, vol. III, no. 1(15), Cambridge University Press Publ., pp. 608-615.

5. Vinotha, D., Raghukandan, K., Pillai, U. T. S., Pai, B. C. Grain refining mechanisms in magnesium alloys – An overview. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, December 2009, vol. 62, iss. 6, pp. 521-532.

6. StJohn, D. H., Easton, M. A., Qian, M., Taylor, J. A. Grain refinement of magnesium alloys: a review of recent research, theoretical developments and their application. *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44A, July 2013, pp. 2935-2949.

7. Karakulak, Erdem. A review: Past, present and future of grain refining of magnesium castings. *Journal of Magnesium and Alloys*, no. 7, 2019, pp. 355-369.

8. Yano, Eiji., Tamura, Yousuke., Motegi, Tetsuichi., Sato, Eiichiro. Effect of Carbon Powder on Grain Refinement of an AZ91E Magnesium Alloy. *Materials Transactions*, vol. 44, no. 1, 2003, pp. 107-110.

9. StJohn, D. H., Cao, P., Qian, M., Easton, M. A. A brief history of the development of grain refinement technology for cast magnesium alloys. *Proceedings of a Symposium Magnesium Technology 2013 TMS 2013 Annual Meeting & Exhibition. San Antonio, Texas, USA March 3-7, 2013*, pp. 3-8.

10. Shalomoev, V., Tsivirco, E., Vnukov, Y., Osadchaya, K., Makovskyi, S. Development of new casting magnesium based alloys with increased mechanical properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 4, no. 1(82), pp. 4-10.

11. Wang, T., Zhu, T., Sun, J., Wu, R., Zhang, M. Influence of rolling directions on microstructure, mechanical properties and anisotropy of Mg-5Li-1Al-0.5Y alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, vol. 3, iss. 4, pp. 345-351.

12. Jia, H., Feng, X., Yang, Y. Influence of solution treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of Mg-4Zn alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, vol. 3, iss. 3, pp. 247-252.

13. Lia, C. Q. et al. Effect of temperature on the mechanical abnormality of the quasicrystal reinforced Mg-4 %Li- 6% Zn-1.2 %Y alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, vol. 3, iss. 2, pp. 106-111.

14. Chen, J. et al. Effects of Ti addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Zr-Ca alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, vol. 3, iss. 2, pp. 151-157.

15. Chen, H. L. et al. Phase stability, electronic, elastic and thermodynamic properties of Al-Re intermetallics in Mg-Al-Re alloy: A first principles study. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, vol. 3, iss. 3, pp. 197-202.

Поступила в редакцію 12.07.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

## МОДИФІКУВАННЯ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МЛ15 НАНОПОРОШКОМ ВУГЛЕЦЮ

С. Г. Маковський, В. В. Лукінов, В. В. Ключихін,  
В. А. Шаломєєв, С. П. Шейко

Розвиток сучасної авіакосмічної техніки потребує постійної підвищення експлуатаційних характеристик, таких, тому, застосування удосконалених легких сплавів стає дедалі актуальним. Магнієві сплави є одними з найкращих конструкційних матеріалів, тому їх застосування в авіакосмічній техніці у т.ч. у силових з'ягодах, дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики, такі, як питома потужність та паливна ефективність. Особливо актуальним є підвищення фізико-механічних властивостей магнієвих сплавів системи Mg-Al-Zn за рахунок управління їх структурними характеристиками за допомоги модифікування. Запропонована високоефективна малозатратна технологія модифікування магнієвого сплаву МЛ15 мікродомішками нанопорошку технічно чистого вуглецю. Проведено порівнявальне металографічне дослідження матеріалу зразків зі зростаючими присадками нанопорошку вуглецю (0,001 %, 0,005 %, 0,01 %, 0,05 %, 0,1 % мас.). Було виявлено, що оптимальна присадка у розплав наномодифікатора у кількості 0,005% по масі сприяє подібненню евтектоїду. Розмір  $[\delta+\gamma]$  - фази та величина мікрозерна зменшилися приблизно у 1,5 рази. Виявлено, що модифікування структури металу вуглецевими наночастками ефективно у вузькому інтервалі їх концентрації у розплаві. Зокрема, додавання у розплав присадки нанопорошку у кількості 0,1% по масі та більше приводило до утворення внутрішніх дефектів у металі – мікропористості та плівкових забруднень. Присадки нанопорошку вуглецю у сплав МЛ15 сприяли підвищенню його пластичних властивостей. При цьому, присадки модифікатора у кількості 0,005...0,01 % мас. у сплав забезпечили максимальне (~ 2 рази) підвищення пластичних властивостей металу та незначне підвищення рівня його міцності. Подальше зростання кількості модифікатора, що додається призводило до деякого зменшення механічних властивостей сплаву. Таким чином, модифікування магнієвих сплавів системи Mg-Al-Zn мікродомішками вуглецевих на-

ночасток є перспективним засобом підвищення фізико-механічних властивостей відливків деталей відповідального призначення для аерокосмічної техніки.

**Ключові слова:** модифікування; магнієвий сплав; вуглецеві наночастки; центри кристалізації; мікроструктура; макрозерно; евтектоїд ( $\delta+\gamma$ ).

## INOCULATION OF ML5 MAGNESIUM ALLOY WITH CARBON NANOPOWDER

*S. Makovskyi, V. Lukinov, V. Klochykhin,  
V. Shalomeev, S. Sheyko*

The development of contemporary aerospace engineering requires consistent improvement of operating characteristics, therefore, the use of advanced light materials becomes more and more urgent. As magnesium alloys are one of the lightest structural materials, their utilization in power plants allows for enhancement of performance characteristics, such as specific power and fuel efficiency. Especially topical is the improvement of the physical and mechanical properties of the magnesium alloys (Mg-Al-Zn system) by controlling their structural characteristics through inoculation. An efficient low-cost grain refinement technique for ML5 magnesium alloy with micro additions of commercially pure carbon nanopowder has been suggested. A comparative metallographic examination of the specimens material with incremental additions of the carbon nanopowder (0.001 %, 0.005 %, 0.01 %, 0.05 %, 0.1 % wt.). It has been shown that an optimum addition of the nanopowder in the quantity of 0.005 % wt. contributes to the refinement of the macro- and microstructure and increases a full set of mechanical properties. The addition of the carbon nanosized grain refining agent has also contributed to the refinement of the eutectoid. [ $\delta+\gamma$ ] phase and the macro grain size have decreased approximately by a factor of 1.5. It has been found that the inoculation of the metal structure is effective within a narrow range of the inoculant concentration in the melt. In particular, the addition of the carbon nanopowder in the quantity of 0.1 % wt. and above led to the formation of internal flaws in the metal – microporosity and film inclusions. The additions of the carbon nanopowder in ML5 alloy have also contributed to the improvement of the ductility properties. In so doing, the addition of 0.005...0.01 % wt. provided for the maximum (approximately two times) increase of the ductility properties and to some extent beneficial for the tensile strength of the alloy. Further increase of the inoculating agent concentration led to some deterioration of the mechanical properties of the alloy. Thus, the inoculation of the magnesium alloys of Mg-Al-Zn system with micro additions of the carbon nanoparticles is a promising method of improvement of the physical and mechanical properties of cast parts for critical aerospace applications.

**Keywords:** inoculation; magnesium alloy; carbon nanoparticles; inoculation sites; microstructure; macrograin; eutectoid ( $\delta+\gamma$ ).

**Маковський Спартак Геннадьевич** – ведучий інженер управління головного металурга, АО "МОТОР СИЧ", Запоріжжя, Україна.

**Лукинов Владимир Васильевич** – начальник цеха лиття цветных металлов и сплавов, АО "МОТОР СИЧ", Запоріжжя, Україна.

**Клочихин Владимир Валерьевич** – главный металлург, АО "МОТОР СИЧ", Запоріжжя, Україна.

**Шаломеев Вадим Анатольевич** – д-р техн. наук, проф., Запоріжский университет "Запоріжская политехника", Запоріжжя, Україна.

**Шейко Сергей Петрович** – канд. техн. наук, доцент, Запоріжский национальный университет, Запоріжжя, Україна.

**Spartak Makovskyi** – Project engineer of the Chief Metallurgical Engineer, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID Author ID: 0000-0003-4921-132X.

**Vladimir Lukinov** – Manager of non-ferrous metal and alloys foundry shop, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID Author ID: 0000-0002-7582-6216.

**Vladimir Klochykhin** – Chief Metallurgical Engineer, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID Author ID: 0000-0002-0754-5543.

**Vadym Shalomeyev** – Doctor of technical Science, professor of Zaporozhye University "Zaporozhskaya Polytechnika", Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: shalomeev@radiocom.net.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-6091-837X.

**Sergei Sheyko** – PhD, associate professor of Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine,  
ORCID Author ID: 0000-0001-5761-4263.