

УДК 669.018.28

С. Г. Маковский¹, В. В. Лукинов¹, Э. И. Цивирко², В. А. Шаломеев²¹АО «Мотор Сич», ²Запорожский национальный технический университет; г. Запорожье

НАНОТЕХНОЛОГИЯ В ПОВЫШЕНИИ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Исследовано влияние углеродных наночастиц на микро-, макроструктуру и механические свойства магниевого сплава МЛ-5. Установлено, что наночастицы углерода оказывают положительное влияние на свойства пластичности сплава МЛ-5.

Ключевые слова: магниевый сплав, наночастица, модифицирование, компактированные брикеты, механические свойства, интерметаллидная фаза.

В связи с постоянным ужесточением требований к новым авиационным изделиям по массе и топливной экономичности особенно актуальным является повышение свойств магниевых сплавов. Литейные магниевые сплавы являются наиболее легкими конструкционными материалами, что позволяет их широко использовать для изготовления корпусных деталей авиационных двигателей и узлов трансмиссий вертолетов. Ввиду того, что магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых сплавов, в 4 раза легче стали, их применение, особенно в фасонном литье, дает снижение весовых характеристик изделия на 25–30 % [1]. Между тем, применение литейных магниевых сплавов ограничивается такими факторами, как сравнительно невысокие механические свойства при комнатной температуре и низкая жаропрочность. В настоящее время в авиационной промышленности существует потребность в высокопрочных литейных магниевых сплавах с пределом прочности $\sigma_g = 260...300$ МПа и выше, имеющих повышенную коррозионную стойкость [2].

В течение последнего десятилетия в странах с высокоразвитой аэрокосмической индустрией, в т. ч. в России, США, Великобритании, Германии, Франции, Китае и Японии активно ведутся разработки в области применения наноматериалов и нанотехнологий при усовершенствовании существующих и разработке новых конструкционных материалов с уникальными свойствами [3, 4].

Для литья корпусных деталей авиационного назначения широко используются магниевые сплавы системы Mg-Al-Zn. Присутствие алюминия в этой системе требует, чтобы данные сплавы подвергались измельчению зерна. До настоящего времени разработан ряд методов измельчения зерна в магниевых сплавах, содержащих алюминий, в т. ч. перегрев расплава, модифицирование углеродом, Эльфиналь – процесс, естественное модифицирование путем контроля содержа-

ния примесей, а также введение частиц металлов и неметаллов. Несмотря на это, для данной группы сплавов в настоящее время отсутствует подходящий модификатор, оказывающий устойчивый модифицирующий эффект и являющийся простым в применении [5].

На современном этапе развития технологии литейного производства одним из новейших направлений в повышении свойств магниевых сплавов является исследование по введению наночастиц металлов, керамики и углеродсодержащих материалов [6–8]. Большой интерес, в частности представляет модифицирование расплава углеродными наночастицами. Несмотря на большой объем научных исследований в этом направлении, влияние модифицирования углеродом на свойства литейных магниевых сплавов является недостаточно изученным, при этом четкое объяснение механизма модифицирования углеродом отсутствует.

Углерод представляет интерес благодаря свойству аллотропии. Природная кристаллическая форма углерода – графит имеет благоприятные факторы по отношению к магнию. В частности, графит имеет сходную с магнием гексагональную структуру; в кристаллическом состоянии углерод термодинамически наиболее устойчив [9].

Введение углеродных наночастиц сопряжено, однако, с рядом трудностей. Основная проблема заключается в обеспечении высокой воспроизводимости введения заданной концентрации углеродных наночастиц в жидкий сплав, исключая при этом внесение избыточного углерода, негативно влияющее на коррозионную стойкость магниевого сплава. Кроме того, наноразмерные частицы имеют тенденцию при введении не распределяться в материале равномерно, а образовывать конгломераты.

Целью настоящей работы является исследование влияния введения углеродных наночастиц на структурообразование и физико-механические свойства отливок из магниевого сплава МЛ5.

В задачи исследования входит определение эффективности введения наночастиц углерода в расплав в форме компактированных брикетов; изучение влияния наночастиц углерода на морфологию составляющих структуры магниевого сплава МЛ5; определение зависимости между морфологией структуры сплава и его пластичностью.

Химический состав сплава МЛ-5 соответствует ГОСТ 2856-68. В сплаве опытной плавки № 27-1 содержание алюминия было ближе к верхнему допустимому пределу (табл. 1).

Сплав модифицировали углеродистыми веществами путем введения в расплав готовых наночастиц углерода. Одновременно с наночастицами углерода вводили порошок технического мела.

Мел при модифицировании расплава разлагается по следующей реакции:



В качестве углеродного модификатора был использован графитовый препарат (ГП) с размером наночастиц 218 мкм (рис. 1). Для ввода наночастиц ГП в расплав были изготовлены компактированные брикеты (таблетки) (рис. 2). В качестве наполнителя, способствующего равномерному распределению наночастиц в объеме расплава, использовали мел молотый природный марки «А». В состав таблеток модификатора в небольшом количестве входила техническая сера (~7,5 % от массы таблетки).

Магниевый сплав МЛ-5 выплавляли в индукционной тигельной печи типа ИПМ-500 по серийной технологии. Расплав рафинировали флюсом ВИ-2 в раздаточной печи при температуре 760 °С. Расплав отбирали ручным ковшем. Компактированные брикеты модификатора вводили в расплав МЛ-5 в количестве 0,03 % по массе с помощью предварительно подогретого газовым пламенем колокольчика закрытого типа. Температура расплава при введении модификатора составляла 760 °С; контроль температуры осуществлялся с помощью термопары погружения. Расплав после введения модификатора тщательно перемешивали в течение 90 с и заливали стандартные образцы для механических испытаний с рабочим диаметром 12 мм в песчано-глинистую форму.

Отлитые образцы проходили термическую обработку в печах типа Бельвью и ПАП-4М по режиму Т6: закалка при температуре 415 °С, выдержка 12 ч + старение при температуре 200 °С, выдержка 6 ч. Предел прочности при растяжении и относительное удлинение образцов определяли на разрывной машине Р5 при комнатной температуре.

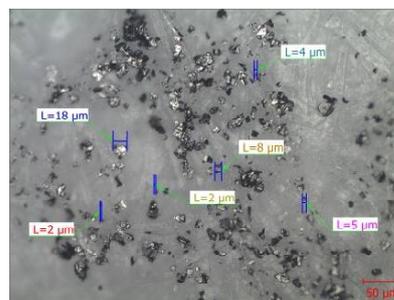


Рис. 1. Частицы графитового препарата, × 200

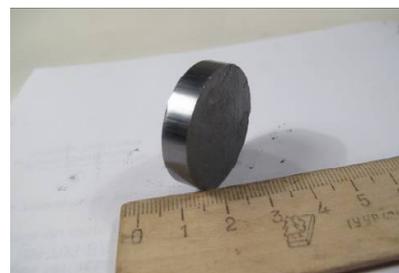


Рис. 2. Компактированный брикет 37 % ГП; 55,5 % CaCO₃; 7,5 % S

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе ф. Karl Zeiss. Металлографическим исследованием шлифов, выполненных в перпендикулярном направлении к продольной оси образцов, установили, что введение наночастиц коллоидного графита в количестве 0,030 % от массы жидкого металла не привело к заметному измельчению макрозерна. Вместе с тем, модифицирование углеродными наночастицами в такой концентрации приводит к уменьшению количества интерметаллидной фазы Mg₁₇Al₁₂ по границам зерен и ее дроблению (рис. 3, 4). Необходимо отметить, что уменьшение количества и более равномерное распределение фазы Mg₁₇Al₁₂ способствует повышению сопротивления сплава ползучести, поскольку деформация ползучести в магниевых сплавах системы Mg-Al и Mg-Al-Zn

Таблица 1 – Химический состав литейного магниевого сплава МЛ-5 (% по массе)

Сплав	Al	Mn	Zn	Mg	Примеси, не более, %		
					Si	Fe	Cu
Плавка №27-1	8,71	0,221	0,33		0,07	0,017	0,003
МЛ-5 ГОСТ 2856-79	7,5–9,0 %	0,15–0,5 %	0,2–0,8 %	основа	0,25	0,06	0,1

происходит посредством скольжения по границам зерен; фаза $Mg_{17}Al_{12}$, имеющая точку плавления равную приблизительно $460\text{ }^{\circ}\text{C}$, является сравнительно мягкой при более низких температурах и не способствует фиксации межзеренных границ. Из этого следует, что введение наночастиц графита может способствовать повышению длительной прочности магниевых сплавов.

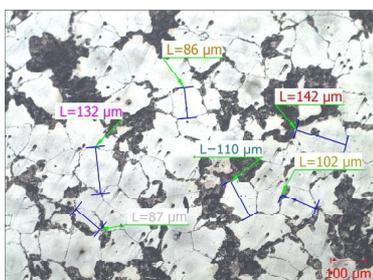


Рис. 3. Микроструктура сплава МЛ-5 без модифицирования после термообработки Т6, $\times 100$

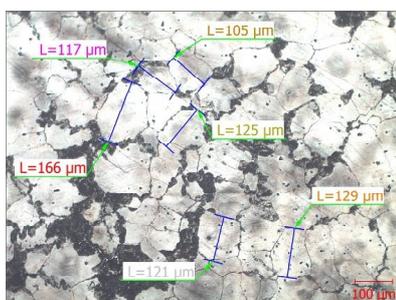


Рис. 4. Микроструктура сплава МЛ-5 с модифицированием после термообработки Т6, $\times 100$

В табл. 2 приведены механические свойства отдельно отлитых образцов с диаметром рабочей части 12 мм до и после модифицирования в состоянии термообработки по режиму Т6.

Результаты испытаний образцов из модифицированного сплава МЛ-5 показали, что введение углеродных наночастиц уже в количестве менее 0,03 % от массы жидкого металла приводит к повышению пластичности, а именно относительного удлинения, в $\sim 1,5$ раза. Модифицирование наночастицами в таком количестве, однако, не оказало влияния на измельчение зерна и требует проведения дальнейших исследований.

Выводы

1. Получаемая в результате модифицирования дисперсная интерметаллидная фаза со стабилизированными размерами обеспечивает повышение пластичности сплава в $\sim 1,5$ раза;
2. Модифицирование магниевого сплава МЛ-5 наночастицами коллоидного графита приводит к уменьшению количества интерметаллидной фазы $Mg_{17}Al_{12}$ по границам зерен и ее дроблению;
3. Введение в расплав углеродных наночастиц в форме компактированных брикетов представляет эффективный и малозатратный способ модифицирования;
4. Модифицирование углеродными наноматериалами является перспективным методом повышения свойств литейных магниевых сплавов, требующим проведения дальнейших исследований на расширенной партии плавок для достижения устойчивого модифицирующего эффекта.

Таблица 2 – Механические свойства образцов из сплава МЛ-5 до и после модифицирования в состоянии термообработки по режиму Т6

Технология	Временное сопротивление σ_e (МПа)	Относительное удлинение, %
Без модифицирования	235-243	2,0-2,6
	238,6	2,20
С модифицированием	235-243	2,0-4,6
	238,6	3,30
Требование ГОСТ 2856-79	≥ 235	≥ 2

Список литературы

1. Мухина И. Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов / Мухина И. Ю. // Литейное производство. – 2011. – № 12. – С. 12–15.
2. Мухина И. Ю. Перспективные литейные магниевые сплавы / Мухина И. Ю., Дуонова В. А., Уридия З. П. // Литейное производство. – 2013. – № 5. – С. 2–5.
3. Наноматериалы и нанотехнологии / [Богуслаев В. А., Качан А. Я., Калинина Н. Е. и др.] – Запорожье, АО «Мотор Сич». – 2014. – 208 с.
4. Головин Ю. И. Основы нанотехнологий / Головин Ю. И. – М. : Машиностроение, 2012. – 656 с.
5. David H. StJohn, Ma Qian, Mark A. Easton, Peng Cao, and Hildebrand Grain refinement of magnesium alloys // Metallurgical and materials transactions. – Volume 36A, JULY 2005–1669.
6. Hai Zhi Ye, Xing Yang Liu Review of recent studies in magnesium matrix composites // Journal of materials science 39 (2004). – P. 6153–6171.
7. Jayaraman Jayakumar Recent Development and

- Challenges in Synthesis of Magnesium Matrix Nano Composites / Jayaraman Jayakumar, B. K. Raghunath, T. H. Rao. – A Review. International Journal of Latest Research in Science and Technology ISSN (Online) : 2278–5299. – Vol. 1. – Issue 2 : P. 164–171, July-August (2012) <http://www.mnkjournals.com/ijlrst.htm>.
8. Comments by University of California [Электронный ресурс] www.dailytechinfo.org/нанотехнологии/
9. Мелешко А. И. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты / Мелешко А. И., Половников С. П. – М. : «САЙЕНС ПРЕСС», 2007. – 192 с. : ил.

Поступила в редакцию 12.05.2016

Маковський С.Г., Лукінов В.В., Цивірко Є.І., Шаломєєв В.А. Нанотехнологія у підвищенні властивостей ливарних магнієвих сплавів

Виконано дослідження впливу вуглецевих наночастинок на мікро- та макроструктуру та механічні властивості магнієвого сплаву МЛ5. Встановлено, що наночастки вуглецю справляють позитивний вплив на властивості пластичності сплаву МЛ5.

Ключові слова: магнієвий сплав, наночастка, модифікування, компактовані брикети, механічні властивості, інтерметалідна фаза.

Makovskiy S., Lukinov V., Zyvirko E., Shalomeyev V. Nanotechnology in improvement of cast magnesium alloy properties

Influence of carbonaceous nanoparticles on micro- and macrostructure as well as on mechanical properties of MJ-5 magnesium alloy has been studied. It has been established that the carbon nanoparticles positively influence ductility properties of MJ-5 alloy.

Key words: magnesium alloy, nanoparticle, inoculation, compacted pellets, mechanical properties, intermetallic phase.