

ВОЗДЕЙСТВИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ НАНОПОЛНИТЕЛЕЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА АК12М2МгН

Комаров А.И., Орда Д.В., Искандарова Д.О.

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
al_kom@tut.by*

Введение. В настоящее время в машиностроении эффективно используются литейные алюминиевые сплавы, из которых изготавливают отливки сложной формы, имеющие повышенную плотность и небольшую пористость. Одним из наиболее распространенных материалов этой группы является эвтектический силумин АК12М2МгН, широко применяемый в двигателестроении. Однако исходная литая структура этого сплава характеризуется крупными включениями интерметаллидных соединений и кремния, что не обеспечивает высокий уровень прочностных свойств. Одним из перспективных направлений повышения трибомеханических характеристик силуминов является модифицирование их структуры введением в расплав дисперсных тугоплавких керамических, углеродных или углеродсодержащих частиц. При этом наибольший эффект достигается при использовании наноразмерных добавок, которые обладают повышенной удельной поверхностью, вследствие чего эффект модифицирования наблюдается при введении малых долей модифицирующих компонентов [1-2].

Целью настоящей работы является исследование воздействия гетерофазных углеродсодержащих наноструктурированных наполнителей на структуру и трибомеханические характеристики литейного алюминиевого сплава АК12М2МгН.

Материалы и методика исследования. Модифицирование эвтектического силумина АК12М2МгН (Si-11-13; Cu-1.5-3; Mg-0.8-1.3; Mn-0.3-0.6; Fe-0.4; Zn-0.2; Ti-0.05-0.2; Al-ост., мас. %) осуществлялось путем введения прессовки модифицирующих компонентов в расплав матричного сплава при температуре 750°C. Расплав подвергался перемешиванию и отливался в металлический кокиль цилиндрической формы.

Структурно-фазовое состояние полученных отливок исследовалось методами металлографического анализа с использованием микроскопов XJM300 и МИМ-8 и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Рентгеноструктурные исследования образцов проводились на автоматизированном комплексе на базе дифрактометра ДРОН-3М в Cu-K α -излучении с применением вторичной монохроматизации рентгеновского пучка. Механические испытания на растяжение проводились на универсальной компьютеризированной гидравлической машине INSTRON Satec 300LX в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. Скорость нагружения составляла 5 мм/мин.

Триботехнические испытания выполнялись по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела из закаленной стали (55 HRC) относительно неподвижного образца в среде масла И-40А при скорости скольжения 0,1 м/с и давлении p , которое изменялось по схеме 10 МПа \rightarrow 20 \rightarrow 30 МПа. По результатам испытаний определялись коэффициенты трения f , массовый износ Δm и интенсивность изнашивания I_q ($I_q = \Delta m/L$), где L – путь трения). Потеря массы Δm образцов находилась их взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200. Твердость образцов определялась на универсальном твердомере 2137 ТУ при нагрузке 49 Н.

Для модифицирования сплава использовались два углеродсодержащих наполнителя. Первый модификатор представлял собой синтезированный в соответствии с [3] порошок, содержащий карбид титана и оксид алюминия. В качестве второй добавки использовалась смесь порошка меди ПМС-1 и углеродных нанотрубок [2] (рис. 1в).

Результаты эксперимента и их обсуждение. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, основными фазами первого модификатора являются оксид алюминия α -Al₂O₃ и карбид титана TiC, при этом содержание соединений составляет 27-30% и 50-60% соответственно (рис.1а). Наряду с основными компонентами в составе порошка в небольшом количестве присутствуют не

прореагировавшие вещества исходной шихты (TiO_2 и углерод), титан, а также железо, поступающее в зону реакции со стенок контейнера. Частицы TiC и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ имеют сферическую форму с размером 50–80 нм, а также форму ноноволокон диаметром до 100 нм и длиной до 3 мкм (рис. 1б). Такая морфология композиционного порошка обуславливают его эффективное воздействие на расплав силумина.

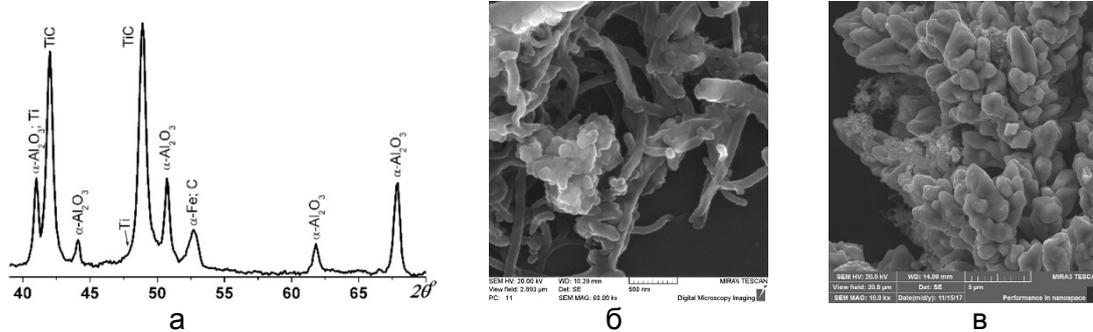


Рисунок 1- Фрагмент дифрактограммы (а) и СЭМ-изображения наполнителей $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (б) и Cu-UNT (в)

Металлографические исследования показали, что использование наполнителя $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в количестве 1 мас.% способствует улучшению структуры матричного материала, которое выражается в формировании округлых зерен α -фазы с размером до 80 мкм, мелкой равномерной эвтектики и интерметаллидных включений глобулярной и пластинчатой формы (рис. 2б). Увеличение доли наполнителя до 2 мас.% приводит к дальнейшему диспергированию структуры. Так, размер зерен α -твердого раствора уменьшается в 2-2,5 раза по сравнению с исходным сплавом, формируется дисперсная зернистая эвтектика, наблюдается равномерное распределение интерметаллидных железо- и медьсодержащих включений по структуре сплава (рис. 2в).

Существенный эффект воздействия на структуру сплава установлен при использовании в качестве модификатора углеродных нанотрубок в смеси с порошком меди. Согласно результатам СЭМ, высокая эффективность модификатора объясняется структурой частиц порошка меди, имеющих дендритное строение (рис. 1в). Такая структура способствует удержанию УНТ на поверхности частиц меди, облегчает введение добавки в расплав и повышает ее реакционную способность. Металлографический анализ показал, что модифицирование сплава AK12M2MgH углеродными нанотрубками, вводимыми совместно с медью, приводит к интенсивному диспергированию его структуры. При этом эффект достигается при введении малых добавок модификатора. Так, уже при содержании 0,05% УНТ и 0,25% меди наблюдается разбиение дендритов на отдельные зерна с размером 30–50 мкм (рис. 2г). Происходит измельчение железосодержащих включений в 6-8 раз и равномерное их распределение по объему сплава. Увеличение содержания добавки до 0,4% УНТ и 2% Cu приводит к более интенсивному диспергированию структурных составляющих, при этом зерна α -фазы приобретают преимущественно глобулярную форму с размером до 40 мкм (рис. 2д).

Диспергирование структуры сплава при введении исследуемых добавок обеспечивает существенное повышение его механических характеристик (таблица). Так, введение добавки Cu-UNT способствует повышению твердости и предела прочности сплава, значение которого возрастает до $\sigma_B=237$ МПа, при одновременном повышении пластичности более чем в 2 раза ($\delta=7,2$ %). Анализ триботехнических характеристик образцов модифицированного сплава AK12M2MgH показал, что введение наполнителя $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (1%) способствует снижению коэффициента трения в 1,3-1,7 раз и повышению износостойкость в 2 раза, а увеличение доли добавки до 2% приводит к многократному повышению износостойкости. Введение комплексной добавки УНТ с медью приводит к снижению f во всем диапазоне исследуемых давлений. Увеличение содержания УНТ от 0,05 до 0,4% и Cu от 0,25 до 2%

сопровождается дальнейшим снижением коэффициента трения (таблица) и к многократному повышению его износостойкости (износ не выявлен).

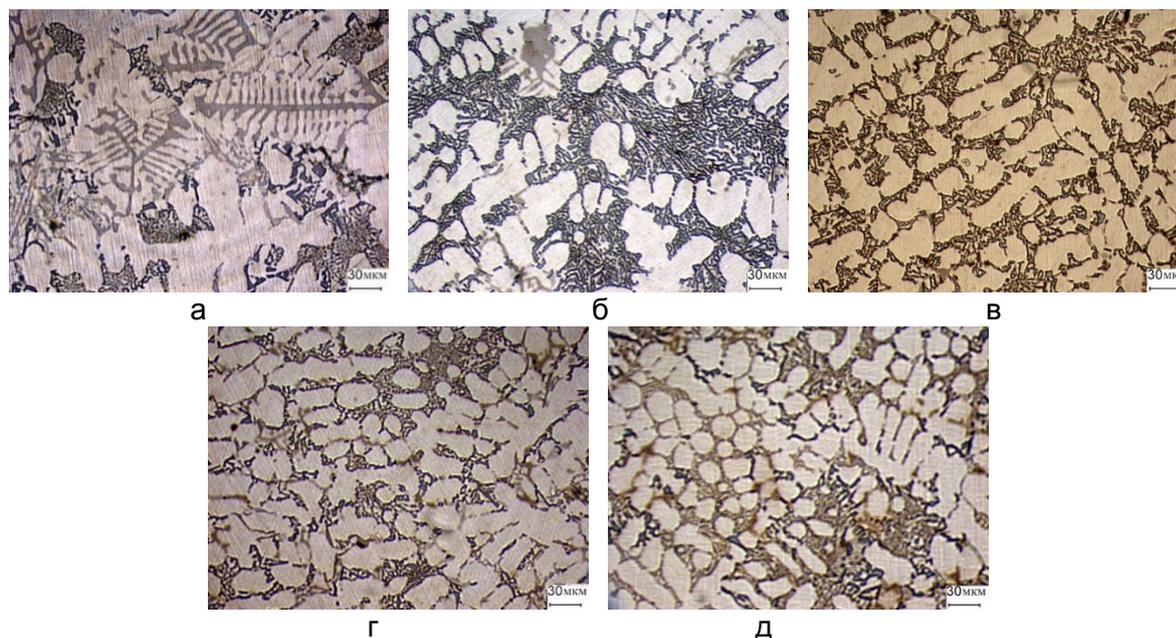


Рисунок 2 - Микроструктура сплава АК12М2МгН до (а) и после модифицирования: б – $Q_{\text{МОД}}=1,0\%$; в – $Q_{\text{МОД}}=2,0\%$; г – $Q_{\text{УНТ}}=0,05\%$, $Q_{\text{Cu}}=0,25\%$; д – $Q_{\text{УНТ}}=0,4\%$, $Q_{\text{Cu}}=2\%$

Таблица – Механические характеристики сплава АК12М2МгН

Образец	Количество модифицирующей добавки. %		HV, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$I_q, 10^{-5}$ мг/м	f_{10}	f_{20}	f_{30}
1	-	-	950	155	3,4	9,26	0,030	0,032	0,035
2	$Q_{\text{УНТ}}=0,05$	$Q_{\text{Cu}}=0,25$	990	202	4,6	→0	0,008	0,007	0,010
3	$Q_{\text{УНТ}}=0,4$	$Q_{\text{Cu}}=2$	1100	237	7,2	→0	0,006	0,006	0,007
4	$Q_{\text{TIC}}=1,0$	$Q_{\text{Al-Mg}}=1,0$	990	-	-	4,63	0,017	0,022	0,028
5	$Q_{\text{TIC}}=2,0$	$Q_{\text{Al}}=0,4$	1020	-	-	→0	0,018	0,020	0,024

Заключение. Использование комплексных модификаторов, содержащих углеродные компоненты, оказывает существенное влияние на структуру, свойства и трибомеханические характеристики сплава АК12М2МгН. Это выражается в диспергировании и сфероидизации зерен α -фазы, измельчении интерметаллидных соединений и их равномерном распределении в объеме отливки. Показано, что в результате формирования такой структуры происходит повышение механических характеристик сплава, значительное снижение коэффициента трения и износа образцов.

Список литературы.

1. Комаров А.И. Синтез карбидо-корундового наполнителя и его воздействие на структуру и свойства поршневого сплава АК12М2МгН / А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда // Механика машин, механизмов и материалов, 2016. - №1 (34). – с. 81-86.
2. Комаров А.И. Влияние комплексного модифицирования углеродными нанотрубками и медью на структуру и свойства силумина АК12М2МгН / А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда, Д.О. Искандарова // Актуальные вопросы машиноведения, 2017. – Выпуск 6. – с. 369-371.
3. Комаров А.И., Комарова В.И., Орда Д.В. Композиционный порошок и способ его получения. Заявка на изобретение а20160246 ВУ от 27.06.2016 г.