

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРШНЕВОГО  
СПЛАВА АК12М2МГН, КОМПЛЕКСНО  
МОДИФИЦИРОВАННОГО УНТ И МЕДЬЮ**

**Комаров А.И., Комарова В.И., Искадарова Д.О., Орда Д.В.**  
*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: al\_kom@tut.by*

**Введение**

В настоящее время с развитием двигателестроения все большие требования предъявляются к конструкционным материалам, а именно повышению их эксплуатационных характеристик. Одним из таких материалов является поршневой сплав АК12М2МгН, литая структура которого не обеспечивает необходимый уровень свойств. Одним из наиболее перспективных методов улучшения свойств силуминов является диспергирование структуры путем введения в расплав тугоплавких керамических наночастиц. В работах [1–3] нами исследовано влияние на структуру сплава АК12М2МгН наночастиц синтезируемых комплексных гетерофазных наполнителей  $\text{BN-AlN-AlB}_2$  [1],  $\text{TiC-}\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  [2],  $\text{SiC-}\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  [3], из которых следует, что введение указанных наночастиц в расплавы приводит к диспергированию микроструктуры создаваемых КМ, и, как следствие, улучшению трибомеханических свойств – повышению износостойкости, несущей способности, снижению коэффициента трения создаваемых КМ.

Целью данной работы является исследование воздействия углеродных нанотрубок (УНТ) совместно с порошком  $\text{Cu}$  на структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства получаемых КМ на основе силумина АК12М2МгН, основываясь на предположении, что УНТ, включенные в расплав, претерпевают фазовое превращение в графит, являющийся дополнительной твердой смазкой, а медь повышает усвояемость наночастиц углерода расплавом и снижает степень его окисления. Следует отметить, что для достижения повышенных антифрикционных свойств КМ авторами [4] совместно с частицами керамических соединений вводился микронный порошок графита. Однако значимый эффект не был достигнут.

**Материалы и методика исследования**

В качестве матричного материала при получении КМ использовали силумин АК12М2МгН состава (мас. %):  $\text{Si-11-13}$ ;  $\text{Cu-1.5-3}$ ;  $\text{Mg-0.8-1.3}$ ;  $\text{Mn-0.3-0.6}$ ;  $\text{Fe-0.4}$ ;  $\text{Zn-0.2}$ ;  $\text{Ti-0.05-0.2}$ ;  $\text{Al-ост.}$  Изготовление КМ осуществлялась путем введения прессовки УНТ- $\text{Cu}$  в расплав ( $750^\circ\text{C}$ ) этого сплава методом «колокольчика». После выдержки 10–15 мин при этой температуре расплав отливался в металлический кокиль. Структурное состояние образцов полученных отливок КМ исследовалось методами металлографического анализа с использованием микроскопов ХМ300 и МИМ-8, Определение микротвердости осуществлялось на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,196 Н.

Триботехнические испытания выполнялись в условиях граничного трения в среде индустриального масла И-40 по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела из закаленной стали (55 HRC) относительно неподвижного образца размером  $6*6*10$  мм при скорости скольжения 0,1 м/с. При проведении испытаний номинальное давление  $p$  пошагово возрастало  $10 \rightarrow 20 \rightarrow 30$  МПа. По результатам испытаний определялись коэффициенты трения  $f$ , массовый износ  $\Delta m$  и интенсивность изнашивания  $I_q$  ( $I_q = \Delta m/L$ , где  $L$  – путь трения). Потеря массы  $\Delta m$  образца находилась его взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200.

**Результаты эксперимента и их обсуждение**

Металлографические исследования структуры сплава АК12М2МгН показали, что в исходном состоянии он имеет игольчатую эвтектику, находящуюся между ветвями  $\alpha$ -фазы (рис.1,а). На границе раздела  $\alpha$ -фазы–эвтектика располагаются включения кремния неправильной формы с размером частиц 10–20 мкм. В теле зерен  $\alpha$ -фазы располагаются скелетообразные и игольчатые интерметаллидные включения

железосодержащих фаз, размер которых достигает 200–250 мкм. Формирование такой структуры не обеспечивает высоких трибомеханических свойств сплава (табл. 1)

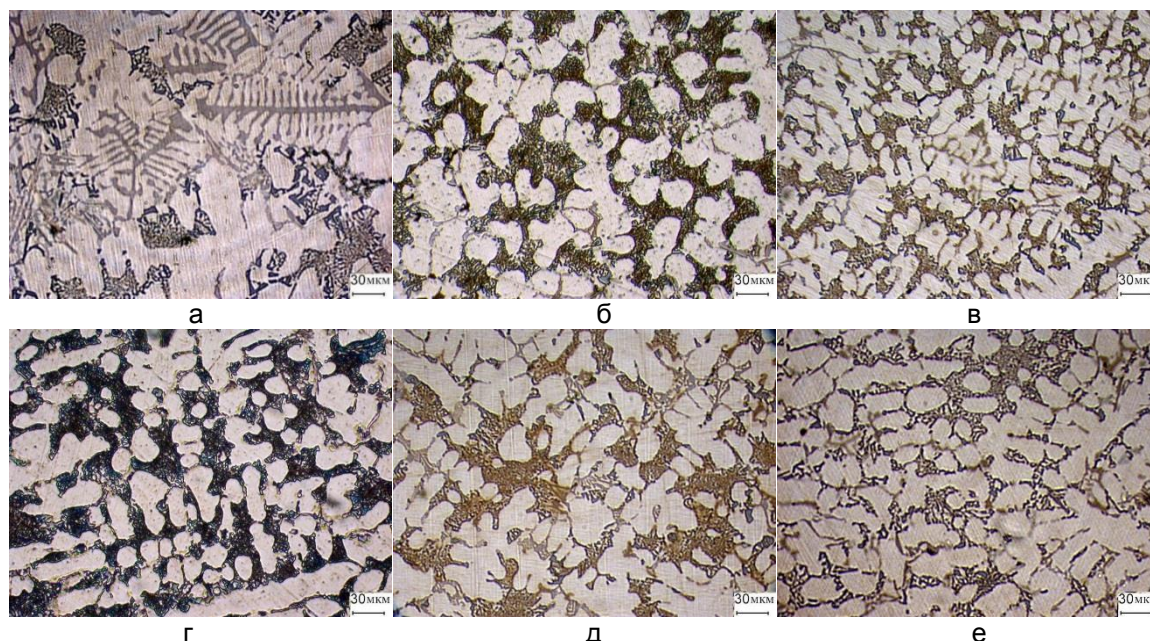


Рисунок 1 – Микроструктура исходного сплава АК12М2МgН (а) и модифицированных образцов отливки: КМ3– б; КМ4 – в; КМ6 – г; КМ7 –д; КМ14 – е

Таблица 1 – Количественное содержание модификатора (Q) УНТ, Си и эвтектики, размер зерен и частиц структурных составляющих КМ, их микротвердость  $H_{\mu}$ , твердость HV, интенсивность изнашивания  $I_q$ , средний коэффициент трения  $f$  при  $p=30$  МПа

Образец КМ	$Q_{\text{УНТ}}$ , %	$Q_{\text{Cu}}$ , %	$Q_{\text{Эвт}}$ , %	Размер зерен и частиц фаз, мкм			$H_{\mu}$ , МПа		HV, МПа	$I_q$ , $10^{-5}$ мг/м	$f^{**}$
				$\alpha$ -фаза	Si	интерметаллиды	$\alpha$ -фаза	эвтектика			
АК12М2МgН	-	-	22	70	10–12	100-120	720	940	950	9,26	0,035
КМ3	0,5	-	27	35	8–10	20-30	586	900	960	0	0,008
КМ4	0,4	3	22	25	1–7	35-40	827	1030	1210	3,27	0,011
КМ6*	0,4	2	35	23	1–7	10-15	630	990	1020	1,54	0,015
КМ7	0,4	2	28	20	6–10	20-25	760	900	1100	0	0,004
КМ14*	0,05	0,25	26	38	4–8	25-30	704	862	990	0	0,010

\*- в расплав дополнительно введен  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$

Модифицирование расплава углеродными нанотрубками в количестве 0,5% приводит к формированию диспергированной структуры в КМ3 с большей объемной долей эвтектики (рис.1, б) по сравнению с исходным силумином. При этом в зернах  $\alpha$ -фазы и на их границе с эвтектикой располагаются иглообразные интер-металлидные включения, которые способствуют разбиению  $\alpha$ -областей на более мелкие зерна (рис.1,б). Формирование данной структуры приводит к снижению коэффициента трения со значения 0,035 до 0,008 (в 4–5) раз, а также многократному увеличению износостойкости образца КМ3, поскольку его износ не обнаружен.

Введение в расплав УНТ совместно с медью приводит к интенсивному диспергированию структуры (рис.1,в), при этом введение меди в количестве 3 мас.% (КМ4) способствует значительному повышению микротвердости структурных составляющих и как следствие твердости образца отливки КМ4. При этом наблюдается снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения в 2,5–3 раза в сравнении с базовым сплавом (рис.1,в).

Введение в расплав УНТ и Си совместно с  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (КМ6) способствует формированию зернистой мелкодисперсной эвтектики, увеличению её объемной доли

на 10-12% и повышению микротвердости, а также образованию интерметаллидных включений неправильной формы с размером до 20 мкм, а также глобулярных зерен матрицы (рис.1,г). Такая структура обеспечивает снижение  $f$  в 2–3 раза и  $I_q$  в 5–6 раз. Исследования прочностных свойств данного КМ показывают, повышение прочности на разрыв на 25%.

Снижение доли вводимой меди до 2% и дополнительному введению в расплав криолита (КМ7) приводит к формированию дисперсной структуры, при этом интерметаллиды с размером частиц 25 мкм располагаются преимущественно по границе раздела фаз, что, вероятно, приводит к некоторому снижению микротвердости (рис.1,д). При этом наблюдается снижение коэффициента трения в 8–9 раз, а также многократное повышение износостойкости образца КМ7 в сравнении с образцом КМ4, с большим содержанием Си.

Уменьшение количества вводимых модифицирующих компонентов (образец КМ14) приводит к некоторому огрублению структуры в сравнении с образцами КМ, где количество модифицирующей добавки выше. Наблюдается увеличение размеров зерен  $\alpha$ -фазы, снижение объемной доли эвтектики, что приводит к снижению твердости (рис.1,е). Однако размер и форма интерметаллидов остается на прежнем уровне, что способствует снижению  $f$  в 3–3,5 раза и многократному увеличению износостойкости в сравнении с композитами КМ4, КМ6 и базовым сплавом.

### Заключение

Анализ результатов исследования показывает, что при введении УНТ с Си в расплав в малых долях приводит к диспергированию структуры сплава АК12М2МгН и повышению триботехнических характеристик КМ. Увеличение доли УНТ приводит к повышению твердости сплава и трибомеханических характеристик КМ, в то время как повышение доли Си, вводимой в расплав, сопровождается снижением износостойкости и ростом коэффициента трения в сравнении с образцами КМ с малой долей Си.

### Список литературы:

1. Витязь П.А. Влияние фазового состава наноструктурированного тугоплавкого модификатора на структуру и триботехнические свойства сплава АК12М2МгН / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова, А.А. Шипко, В.В. Овчинников, С.А. Ковалева // Трение и износ. - 2013. – Том 34, №5. – с. 435-445.
2. 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.
3. Комаров А.И. Воздействие синтезируемой нанокompозиции SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на структурообразование и триботехнические свойства композита на основе поршневого сплава АК12М2МгН / А.И. Комаров, В.И. Комарова, А.А. Шипко, Д.В. Орда // Механика машин, механизмов и материалов. - 2017. - №1 (38). – С. 71-78.
4. Чернышова Т.А. Наноструктурирование дисперсно-армированных алюмоматричных композиционных материалов / Т.А. Чернышова, Л.И. Кобалева, П.А. Быков и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – №4. – с. 53-61.