

УДК 669.715

А.И. КОМАРОВ, канд. техн. наук

заведующий лабораторией технологий модифицирования конструкционных материалов<sup>1</sup>

E-mail: al\_kom@tut.by

Д.В. ОРДА

младший научный сотрудник лаборатории технологий модифицирования конструкционных материалов<sup>1</sup>

Д.О. ИСКАНДАРОВА

младший научный сотрудник лаборатории технологий модифицирования конструкционных материалов<sup>1</sup><sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28.06.2018.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИЛУМИНА АК7 ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАНОПОЛНИТЕЛЯ TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

*В статье рассмотрены структурно-фазовые превращения доэвтектического сплава АК7, происходящие при его модифицировании наноразмерной композицией TiC- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, вводимой совместно с микропорошками алюминия или меди. Показано, что использование микропорошков различной природы и морфологии оказывает прямое воздействие на степень преобразования структуры сплава. При этом наиболее эффективно введение нанополнителя совместно с порошком меди, частицы которой представлены дендритами с развитой поверхностью. Показано, что модифицирование сплава малыми долями (0,5 мас. %) нанополнителя приводит к диспергированию структуры (уменьшению дендритов твердого раствора алюминия и железосодержащих включений в 2 и 3 раза соответственно), а также изменению морфологии интерметаллидных включений. Формирование модифицированной структуры обеспечивает снижение коэффициента трения, повышение износостойкости и расширение диапазона нагрузок. Показано, что введение наноразмерной композиции TiC- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в количестве 0,5 мас. % совместно с микропорошком меди или алюминия приводит к снижению коэффициента трения в 1,8–2 раза при нагрузках до 20 МПа, а дополнительное введение УНТ обеспечивает интенсивное снижение коэффициента трения при 30 МПа до значений 0,016–0,018. Установлено, что использование микропорошков алюминия при введении модификатора обеспечивает повышение износостойкости в 1,4–1,6 раз, а использование меди или меди с УНТ обеспечивает многократное повышение износостойкости (потеря массы на образцах не зафиксирована), тогда как для исходного сплава она составляет  $8,73 \cdot 10^{-5}$  мг/м.*

**Ключевые слова:** нанополнитель, карбид титана, корунд, структурообразование, сплав АК7, коэффициент трения, износостойкость

**Введение.** В настоящее время в машиностроении и других отраслях промышленности все более широкое применение находят литейные алюминиевые сплавы. Среди литейных сплавов на основе алюминия особый интерес представляют сплавы системы Al-Si (силумины), обладающие хорошими технологическими свойствами. Вместе с тем, в исходном литом состоянии, структурные составляющие таких сплавов характеризуются достаточно крупными размерами, что не обеспечивает высокие физико-механические свойства отливаемых деталей [1–2]. Одним из эффективных путей воздействия на структуру литейных сплавов алюминия является их модифицирование тугоплавкими керамическими частицами, в качестве которых широко используют микропорошки карбидов, боридов, нитридов [3, 4]. Анализ литературных данных [3–8] показал, что введение ми-

крочастиц TiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> способствует диспергированию структуры деформируемых высокопрочных сплавов, что приводит к повышению прочности, твердости, износостойкости сплава. Значительный эффект достигается при использовании в качестве модификаторов наноразмерных частиц, обладающих высокой удельной поверхностью, что обеспечивает значительное воздействие на структуру сплава при введении малых долей армирующих компонентов [7–12].

В работах [9–11] разработан технологический подход синтеза наноразмерного композиционного нанополнителя TiC- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также исследовано его влияние на структуру и свойства поршневого сплава АК12М2МгН. Особенность данного метода заключается в пониженной (750–900 °С) температуре синтеза гетерофазных нанополнителей [11]. В работах [9–11] показано, что

введение указанной наноконпозиции приводит к диспергированию микроструктуры сплава, и, как следствие, к снижению коэффициента трения и повышению износостойкости композиционного материала.

Цель данной работы — исследование воздействия нанонаполнителя  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  на структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства алюминий-кремниевый сплав АК7 при совместном введении с микропорошками меди или алюминия.

**Материалы и методика исследования.** Объектом исследования был выбран сплав системы алюминий-кремний марки АК7 следующего химического состава (мас.%): Si-6-8; Fe-1.3; Mn-0.2-0.6; Ni-0.3; Cu-1.5; Mg-0.2-0.5; Zn-0.5; Al-ост.

В качестве модифицирующей добавки использовался композиционный нанонаполнитель, содержащий керамические частицы 27–30 мас.%  $\text{TiC}$  и 50–55 мас.%  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , полученный по методу [11]. Наряду с  $\text{TiC}$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в синтезируемом порошке в небольшом количестве присутствовали Ti (~1%), Fe (2–4%) и непрореагировавшие соединения  $\text{TiO}_2$  (1–3%) и углерод (5–8%). С целью повышения степени усвоения нанонаполнителя алюминий-кремниевым расплавом, его введение осуществлялось совместно с микропорошком алюминия (50–55 мкм), алюминий-магниевого сплава АМг6 (350–400 мкм), меди (до 300 мкм) или меди с углеродными нанотрубками (УНТ) [12].

Модифицирование отливок из сплава АК7 осуществлялось введением в расплав прессонок при 750 °С методом «колокольчика». Далее расплав перемешивали и подвергали выдержке при температуре плавления. Разливка металла проводилась в предварительно нагретый до 400 °С металлический кокиль цилиндрической формы. Из полученных отливок вырезались образцы толщиной 6 мм для исследования структуры и свойств модифицированного сплава. С целью получения

данных о степени воздействия нанонаполнителя  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  на структурообразование и свойства модифицированных образцов сплава АК7, доля армирующей добавки и дополнительно вводимого микропорошка составляла 0,5 и 1 мас.%.

Триботехнические испытания выполнялись в режиме граничного трения с использованием масла И-40А по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела из закаленной стали 65Г (55 HRC) относительно неподвижного образца размером 6 × 6 × 10 мм при скорости скольжения 0,1 м/с. В процессе испытаний номинальное рабочее давление  $p$  пошагово возрастало по схеме 10→20→30 МПа. Продолжительность испытаний на каждой ступени составляла 2–2,5 часа. По результатам испытаний определялись коэффициент трения  $f$  и интенсивность изнашивания  $I_q$  ( $I_q = \Delta m/L$ , где  $L$  — путь трения,  $\Delta m$  — потеря массы образцов, которая определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200). Твердость образцов определяли с использованием твердомера 2137 ТУ, микротвердость образцов отливок определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,196 Н.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рисунке 1 представлена структура частиц нанонаполнителя и микропорошков алюминия и меди.

Согласно представленным данным, наночастицы синтезированного наполнителя ( $\text{TiC}$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) имеют сферическую форму с размерами 50–80 нм, а также форму нановолокон диаметром до 100 нм и длиной до 3 мкм (см. рисунок 1 а).

Анализ морфологии поверхности металлических частиц (см. рисунок 1 б, в) свидетельствует о наличии на их поверхности множественных дефектов. Как хлопьевидная структура алюминиевого порошка, так и дендритное строение частиц меди способствует удержанию модифицирующих частиц, что облегчает их введение в расплав. В качестве примера на рисунке 1 с показаны массивы

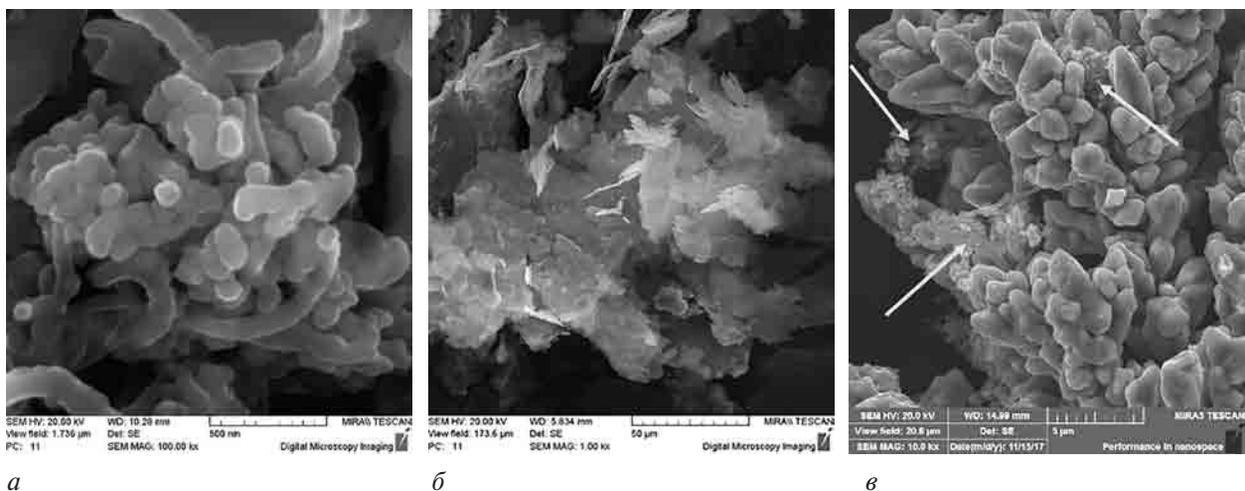
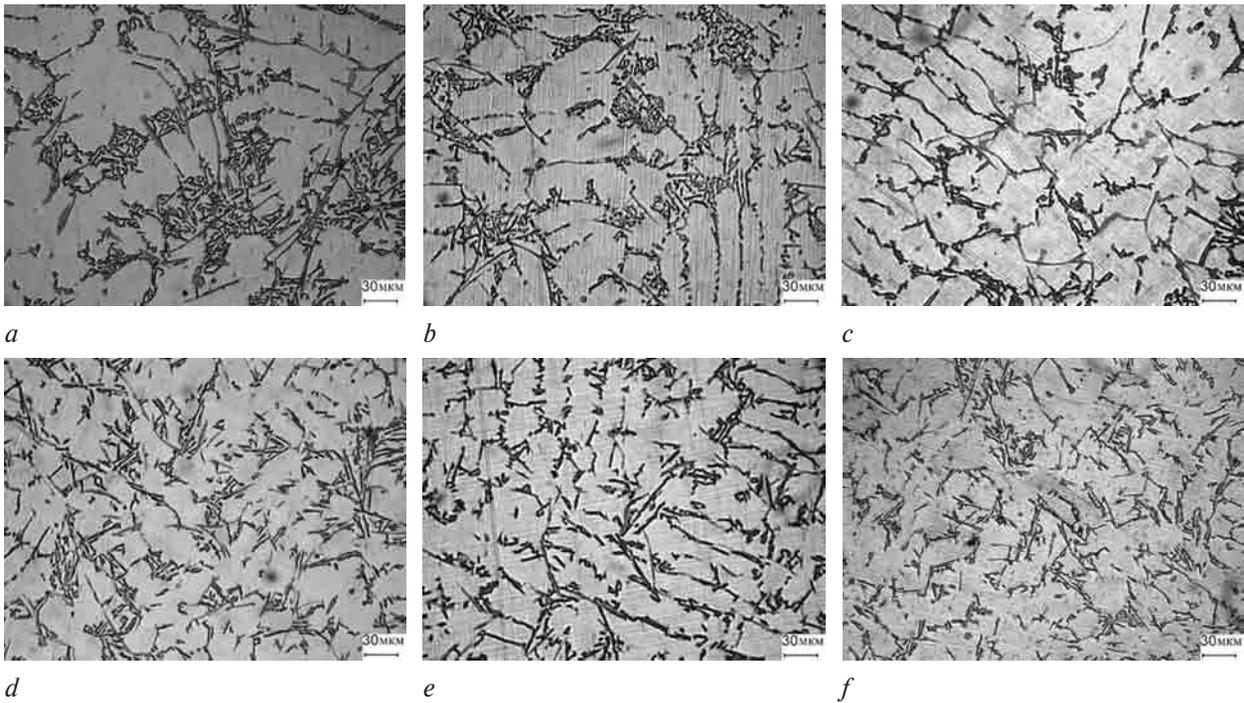


Рисунок 1 — Структура синтезированного нанонаполнителя  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  (а), микропорошка алюминия (б), меди, на поверхности которой находятся частицы УНТ (с)  
Figure 1 — Structure of synthesized nanofiller  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  (a), aluminum micro-powder (b), copper having particles of CNT on surface(c)



**Рисунок 2 — Микроструктура образцов из сплава АК7 до (а) и после модифицирования (б–е):**  
 а — образец АК7-1; б — образец АК7-2; с — образец АК7-3; д — образец АК7-4; е — образец АК7-5; ф — образец АК7-6  
**Figure 2 — Microstructure of samples from AK7 alloy before (a) and after modification (b–f):**  
 а — sample AlSi-1; б — sample AlSi-2; с — sample AlSi-3; д — sample AlSi-4; е — sample AlSi-5; ф — sample AlSi-6

УНТ, закрепленные в междендритных пространствах частицы меди (указаны стрелками).

Сплав АК7 относится к группе доэвтектических силуминов и характеризуется гетерогенной структурой. В исходном литом состоянии твердый раствор алюминия ( $\alpha$ -фаза) кристаллизуется в дендритной форме с размером зерен до 150 мкм. Между ветвями дендритов находится эвтектика с неоднородным распределением частиц кремния по объему. При этом более крупные частицы с размером до 15 мкм формируются на границе раздела фаз (рисунок 2 а). В структуре сплава присутствует два вида интерметаллидных включений: железо- и медьсодержащие, которые имеют игольчатую форму и располагаются как на границе, так и в зернах  $\alpha$ -фазы. Формирование подобной

структуры не обеспечивает высокие эксплуатационные свойства отливок.

Для изучения степени воздействия на процесс модифицирования микропорошков Al или Cu в составе модифицирующей добавки, доля нанонаполнителя  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  оставалась неизменной, за исключением образца АК7-4. Состав вводимой композиции, результаты металлографического исследования структуры и значения твердости образцов сплава АК7, модифицированных наноразмерной композиции  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , представлены в таблице.

Из полученных данных следует, что введение армирующей добавки в малом количестве (0,5–1 мас.%) приводит к диспергированию структуры сплава, что выражается в снижении размеров зе-

**Таблица — Количественное содержание вводимых модифицирующих компонентов ( $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , Al, Cu, УНТ) и размер зерен и частиц структурных составляющих отливок, их микротвердость  $H_\mu$ , твердость  $HV$**   
**Table — Quantitative content of input modifying components ( $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , Al, Cu, CNT) and size of grains and particles of structural components of castings, their microhardness  $H_\mu$ , hardness  $HV$**

Образец	Состав вводимой модифицирующей добавки, %				Размер зерен и частиц структурных фаз, мкм			$H_\mu$ , МПа		$HV$ , МПа
	$\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Al	Cu	УНТ	$\alpha$ -фаза	Si	интерметаллиды	$\alpha$ -фаза	эвтектика	
АК7-1	—	—	—	—	80	10	80	601,2	726,7	793
АК7-2	0,5	0,05	—	—	60	4–6	60	537,3	896,1	793
АК7-3	0,5	1,0 (АМг6)	—	—	60	10	40	522,3	915,6	757
АК7-4	1,0	0,1	—	—	40	6–10	30	491,9	726,7	797
АК7-5	0,5	—	0,5	—	40	8	30	507,9	828,7	793
АК7-6	0,5	—	0,5	0,1	35	6	20	604	901,6	807

рен  $\alpha$ -фазы, частиц кремния и интерметаллидных соединений. При этом использование различных микропорошков в разной степени воздействует на структуру и свойства модифицированного сплава.

Анализ структуры образца АК7-2 показал, что введение микропорошка алюминия в количестве 0,05% совместно с 0,5% нанонаполнителя обеспечивает усвоение тугоплавких частиц, модифицирующих структуру сплава, что приводит к снижению размера  $\alpha$ -фазы до 60 мкм, а также формированию равномерной эвтектики с размером частиц кремния до 6 мкм (см. рисунок 2 б). Такое воздействие приводит к изменению значения микротвердости основных структурных составляющих: микротвердость  $\alpha$ -фазы снижается на 65–70 МПа, а эвтектики возрастает на 160–170 МПа, однако повышение равномерности распределения структурных составляющих обеспечивает сохранение твердости материала на базовом уровне. Аналогичный эффект наблюдается и на образце АК7-3, в котором вместо порошка алюминия вводился 1% микропорошка из сплава АМг6. В данном случае наблюдается более интенсивное диспергирование интерметаллидных фаз, размер которых уменьшается до 40 мкм (см. рисунок 2 с), что может быть вызвано как повышением степени усвоения нанонаполнителя, так и воздействием магния, содержание которого в сплаве АМг6 составляет ~6 мас. %.

Повышение доли вводимой нанодобавки  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и микропорошка алюминия в 2 раза (образец АК7-4) приводит к более ярко выраженному эффекту модифицирования структуры. При этом происходит диспергирование зерен  $\alpha$ -фазы в 2 раза, формируется неравномерная эвтектика с иглообразными частицами Si с размером 6–10 мкм (см. рисунок 2 d). Однако одновременно с измельчением структуры, наблюдается значительное снижение микротвердости  $\alpha$ -фазы на 100–110 МПа. Снижение микротвердости  $\alpha$ -фазы может быть обусловлено изменением степени легирования твердого раствора алюминия кремнием, что подтверждается результатами спектрального анализа структурных фаз образца АК7-4. Согласно этим данным, наблюдается снижение доли растворенного кремния с 1,5–1,6 до 1,1–1,3% (рисунок 3). При этом происходит изменение морфологии медьсодержащих включений, которые формируются в глобулярной форме с размером до 5 мкм и располагаются на поверхности иглообразных железосодержащих интерметаллидных включений.

Анализ структуры образца АК7-5 показал, что использование микропорошка меди способствует усвоению наночастиц расплавом, о чем свидетельствует изменение структуры сплава. Наблюдается измельчение размера зерен твердого раствора алюминия, диспергирование интерметаллидных фаз игольчатой формы, а также формирование рав-

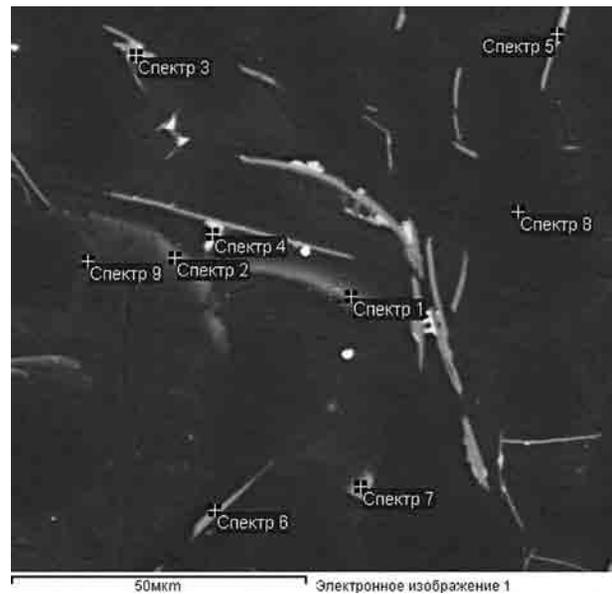


Рисунок 3 — Структура сплава АК7 после модифицирования 1% нанонаполнителя  
Figure 3 — Structure of AlSi7 alloy after modification with 1% of nanofiller

номерной эвтектики с размером частиц до 12 мкм (см. рисунок 2 e). Дополнительное введение в состав модифицирующей добавки углеродных наноконструкций приводит к более интенсивному диспергированию структурных фаз сплава АК7, размер зерен  $\alpha$ -фазы снижается до 30–40 мкм, а размер интерметаллидных включений не превышает 25 мкм (см. рисунок 2 f). Отличительной особенностью данного модифицирующего состава является повышение микротвердости эвтектики на 160–170 МПа, что обеспечивает повышение твердости сплава на 14–18 МПа.

На рисунке 4 приведены результаты триботехнических испытаний образцов силумина АК7 до и после модифицирования в условиях граничного трения. Результаты испытания образцов исходного сплава АК7 показали, что его износостойкость невелика, о чем непосредственно свидетельствует достаточно высокое значение интенсивности изнашивания образцов при нагрузках  $p = 10, 20$  МПа, равное  $I_q = 8,73 \cdot 10^{-5}$  мг/м. Согласно полученным данным, введение нанонаполнителя способствует снижению интенсивности изнашивания сплава. Введение нанонаполнителя  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  совместно с микропорошком алюминия обеспечивает снижение интенсивности изнашивания до 2 раз (образец АК7-3, рисунок 4 d), а использование порошка меди приводит к многократному повышению износостойкости (износ на образцах после испытаний не обнаружен).

Одновременно с этим введение в сплав наночастиц  $\text{TiC}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оказывает существенное влияние на коэффициент трения (см. рисунок 4) образцов испытанных при давлениях 10, 20, 30 МПа.

Испытания образцов при давлении 10 МПа не выявили существенного воздействия на коэф-

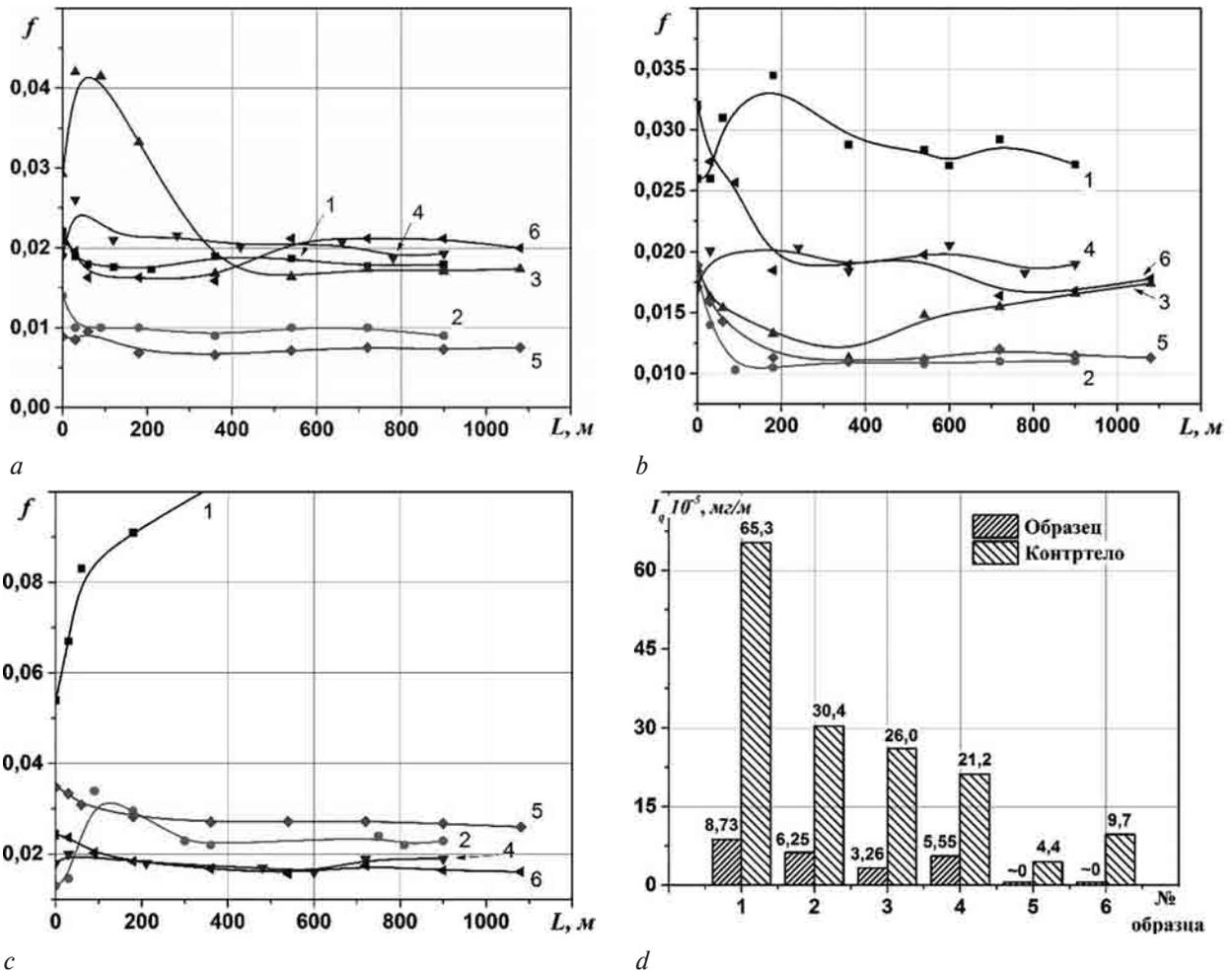


Рисунок 4 — Изменение коэффициента трения в зависимости от пройденного пути при различных рабочих нагрузках (а —  $p = 10$  МПа; б —  $p = 20$  МПа; в —  $p = 30$  МПа) и изменение интенсивности изнашивания (д) образцов из сплава АК7 до и после модифицирования: образец АК7-1 (кривая 1); образец АК7-2 (кривая 2); образец АК7-3 (кривая 3); образец АК7-4 (кривая 4); образец АК7-5 (кривая 5); образец АК7-6 (кривая 6)

Figure 4 — Change of friction coefficient depending on passed path at different working loads (а —  $p = 10$  МПа; б —  $p = 20$  МПа; в —  $p = 30$  МПа) and change in wear intensity (д) of the samples from AlSi7 alloy before and after modification: sample AlSi7-1 (curve 1); sample AlSi7-2 (curve 2); sample AlSi7-3 (curve 3); sample AlSi7-4 (curve 4); sample AlSi7-5 (curve 5); sample AlSi7-6 (curve 6)

коэффициент трения, за исключением образцов АК7-2 и АК7-5. В этом случае, согласно полученным результатам, введение нанонаполнителя в количестве 0,5% совместно с порошком алюминия или меди приводит к снижению коэффициента трения в ~1,8 раз и на стадии установившегося трения имеет значение 0,008–0,010 (см. рисунок 4 а). Такое изменение коэффициента трения указывает на интенсивное воздействие микропорошков на процесс введения и усвоения тугоплавких частиц TiC и  $Al_2O_3$ .

При увеличении давления до 20 МПа все модифицированные образцы показывают значения коэффициента трения ниже базового (см. рисунок 4 б). Так, у образцов АК7-3, АК7-4 и АК7-6 коэффициент трения находится на уровне 0,017–0,019, а у образцов АК7-2 и АК7-5 на уровне 0,011–0,012.

При испытаниях образцов АК7-1 (исходный) и АК7-3 при 30 МПа наблюдается резкое повышение коэффициента трения, что указывает на переход к стадии катастрофического изнашивания

(см. рисунок 4 в). В то же время, образцы, модифицированные нанонаполнителем TiC– $\alpha$ - $Al_2O_3$ , вводимым совместно с микропорошком алюминия или меди, показывают стабильные значения коэффициента трения на протяжении всего периода испытаний. Наилучшим значением коэффициента трения 0,017–0,018, обладает образец АК7-6, в котором модифицирующая добавка вводилась совместно с порошком меди и углерода (см. рисунок 4 с).

Согласно результатам триботехнических испытаний, при давлениях до 20 МПа наилучшим коэффициентом трения обладают образцы АК7-2 и АК7-5, при этом образец АК7-5 характеризуется наименьшим значением интенсивности изнашивания. При повышенных давлениях до 30 МПа наилучшими характеристиками обладают образцы АК7-4 и АК7-6, при этом интенсивность изнашивания у образца, модифицированного нанонаполнителем совместно с порошком меди и углерода, многократно выше.

**Заключение.** Исследованы структурно-фазовые превращения в доэвтектическом силумине АК7, происходящие при его модифицировании наноразмерной композицией  $TiC-\alpha-Al_2O_3$ , вводимой в расплав совместно с микропорошками алюминия и меди. Из полученных данных следует, что наибольшей эффективностью обладает порошок меди вследствие развитой поверхности его частиц. Показано, что при армировании сплава малыми долями (0,5 мас.%) происходит диспергирование структуры сплава: уменьшение зерен  $\alpha$ -фазы, увеличение объемной доли мелкозернистой эвтектики на 10%. Введение модифицирующей наноконпозиции совместно с медью или с медью и углеродом обеспечивает уменьшение размеров зерен  $\alpha$ -фазы в 1,8 раз, а также приводит к формированию игольчатой эвтектики, что способствует повышению ее микротвердости на 100–170 МПа. Формирование такой структуры обеспечивает снижение коэффициента трения в 1,8 раз при нагрузке 10 МПа и в 2 раза при нагрузке 20 МПа, многократное повышение износостойкости, а также расширение диапазона рабочих нагрузок в сравнении с базовым сплавом.

#### Список литературы

1. Металловедение алюминия и его сплавов / Н.Н. Буйнов [и др.]; отв. ред. И.Н. Фридляндер. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Металлургия, 1983. — 280 с.
2. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо; пер. сангл. — М.: Металлургия, 1979. — 640 с.
3. Properties of ceramic-reinforced aluminum matrix composites — a review / D.K. Das [et al.] // International Journal of mechanical and Materials Engineering. — 2014. — № 1:12. — Pp. 1–16.
4. Verresh Kumar, G.B. Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites — a review / G.B. Verresh Kumar, C.S.P. Rao, N. Selvaraj // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. — 2011. — Vol. 10, No. 1. — Pp. 59–91.
5. Abdel-Nasser, M. Omran Development of Al-TiC alloys using powder metallurgy as grain refiners for aluminium and its alloys / M. Omran Abdel-Nasser // Int. Journal of Engineering research and applications. — 2014. — Vol. 4, Is. 7 (Version 6). — Pp. 118–125.
6. Comparative processing-structure-property studies of Al-Cu matrix composites reinforced with TiC particulates / H. Kaftelen [et al.] // Composites: Part A. — 2011. — № 42. — Pp. 812–824.
7. Borodianskiy, K. Mechanical Properties and Microstructure Characterization of Al-Si Cast Alloys Formation Using Carbide Nanoparticles / K. Borodianskiy, M. Zinigrad // Journal of Materials Sciences and Applications. — 2015. — Vol. 1, No. 3. — Pp. 85–90.
8. Михеев, Р.С. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова. — М.: МАСКА, 2013. — 356 с.
9. Комаров, А.И. Синтез наноструктурированных тугоплавких наполнителей, их влияние на структуру и свойства силуминов / А.И. Комаров // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В.В. Клубовича. — Витебск: ВГТУ, 2015. — Т. 2, гл. 12. — С. 202–223.
10. 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.
11. Композиционный порошок  $TiC - \alpha-Al_2O_3$  и способ его получения: пат. ВУ 22136 / А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда. — Опубл. 27.06.2016.
12. Способ модифицирования алюминия или алюминий-кремниевых сплавов: заявка ВУ 20170407 / А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.О. Искандарова, Д.В. Орда. — Опубл. 30.10.2017.

KOMAROV Alexander I., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials<sup>1</sup>

E-mail: al\_kom@tut.by

ORDA Dmitriy V.

Junior Researcher of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials<sup>1</sup>

ISKANDAROVA Donata O.

Junior Researcher of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 28 June 2018.

## PECULIARITIES OF THE STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF SILUMIN AISi7 UNDER THE INFLUENCE OF THE NANOFILLER $TiC-Al_2O_3$

*The article deals with the structural-phase transformations of the pre-eutectic alloy AlSi7, occurring during its modification by nanoscale composition  $TiC-\alpha-Al_2O_3$ , introduced together with micro powders of aluminum or copper. It is shown that the use of micro powders of different nature and morphology has a direct impact on the degree of transformation of the alloy structure. In this case, the introduction of a nanofiller is most effective together with copper powder, the particles of which are represented by dendrites with a developed surface. It is shown that the modification of the alloy by small fractions (0.5 wt.%) of nanofiller leads to dispersion of the structure (reduction of aluminum solid solution dendrites and iron-containing inclusions by 2 and 3 times, respectively), as well as*

changes in the morphology of intermetallic inclusions. The formation of the modified structure reduces the friction coefficient, increases wear resistance and extends the range of loads. It is shown that the introduction of nanoscale composition  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  in the amount of 0.5 wt.% together with the micro powder of copper or aluminum leads to a decrease in the coefficient of friction in 1.8–2 times at loads up to 20 MPa, and the additional introduction of CNT provides an intensive reduction in the coefficient of friction at 30 MPa to values 0.016–0.018. It was found that the use of aluminum micro powders with the introduction of the modifier provides an increase in wear resistance by 1.4–1.6 times, and the use of copper or copper with CNT provides a multiple increase in wear resistance (weight loss on the samples is not fixed), whereas for the initial alloy it is  $8.73 \cdot 10^{-5}$  mg/m.

**Keywords:** nanofiller, titanium carbide, corundum, structure formation, alloy AlSi7, friction coefficient, wear resistance

## References

1. Belyaev A.I., Bochvar O.S., Buynov N.N. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 280 p.
2. Mondolfo L.F. *Aluminum Alloys. Structure and Properties*. London, Butterworth-Heinemann, 1976. 982 p.
3. Das D.K., Mishra P.C., Singh S., Thakur R.K. Properties of ceramic-reinforced aluminum matrix composites — a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2014, no. 1:12, pp. 1–16.
4. Verresh Kumar G.B., Rao C.S.P., Selvaraj N. Mechanical and tribological behavior of particulate rein-forced aluminum metal matrix composites — a review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2011, vol. 10, no. 1, pp. 59–91.
5. Abdel-Nasser M.O. Development of Al-TiC alloys using powder metallurgy as grain refiners for aluminum and its alloys. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, issue 7 (version 6), pp. 118–125.
6. Kaftelen H., Goller G., Unlu N., Henein H. Comparative processing-structure-property studies of Al-Cu matrix composites reinforced with TiC particulates. *Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2011, no. 42, pp. 812–824.
7. Borodianskiy K., Zinigrad M. Mechanical Properties and Microstructure Characterization of Al-Si Cast Alloys Formation Using Carbide Nanoparticles. *Journal of Materials Sciences and Applications*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 85–90.
8. Mikheev R.S., Chernyshova T.A. *Alyumomatrichniye kompozitsionnye materialy s karbidnym uprochneniem dlya resheniya zadach novoy tekhniki* [Aluminum-matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology]. Moscow, Maska Publ., 2013. 356 p.
9. Komarov A.I. Sintez nanostrukturirovannykh tugoplavkikh napolniteley, ikh vliyaniye na strukturu i svoystva siluminov [Synthesis of nanostructured high-melting fillers, their influence on the structure and properties of silumins]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii* [Advanced materials and technologies], 2015, vol. 2, ch. 12, pp. 202–223.
10. Komarov A.I., Komarova D.I., Orda D.V. Sintez karbido-korundovogo napolnitelya i ego vozdeystvie na strukturu i svoystva porshneвого splava AK12M2MgN [Synthesis of carbide-corund filler and its impact on the structure and properties of piston GK-ALSi12(Cu) alloys]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2016, no. 1(34), pp. 81–86.
11. Komarov A.I., Komarova V.I., Orda D.V. *Kompozitsionnyy porshok  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  i sposob ego polucheniya* [Composite powder  $\text{TiC}-\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  and method for its preparation]. Patent RB, no. 22136, 2016.
12. Komarov A.I., Komarova V.I., Iskandarova D.O., Orda D.V. *Sposob modifitsirovaniya alyuminiya ili alyuminiy-kremnievykh splavov* [Method of modification of aluminum or aluminum-silicon alloys]. Application RB, no. 20170407, 2017.