

УДК 669.715

**А.И. КОМАРОВ**, канд. техн. наукзаведующий сектором металловедения и магнитной структуроскопии сталей и сплавов<sup>1</sup>

E-mail: al\_kom@tut.by

**В.И. КОМАРОВА**, канд. физ.-мат. наук, доцентведущий научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении<sup>1</sup>**Д.В. ОРДА**младший научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении<sup>1</sup><sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05.11.2015.

## СИНТЕЗ КАРБИДО-КОРУНДОВОГО НАПОЛНИТЕЛЯ И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОРШНЕВОГО СПЛАВА АК12М2МГН

*Исследован процесс синтеза карбида-корундового наполнителя на основе оксида титана методом газо-фазного осаждения в восстановительной атмосфере аммиака и водорода. Показано, что синтезированный наполнитель включает наноразмерные тугоплавкие соединения — карбид титана и корунд. Установлено, что введение 1 мас. % этого нанонаполнителя сопровождается диспергированием структурных составляющих сплава не менее 2-х раз. Это обеспечивает увеличение микротвердости  $\alpha$ -фазы в 1,5 раза, эвтектики в 2 раза, снижение коэффициента трения в 4–8 раз, многократное повышение износостойкости полученных композитов, что следует из факта отсутствия износа образцов отливок за весь цикл испытаний полученных композитов, тогда как интенсивность изнашивания образца из сплава АК12М2МГН только при нагрузке 20 МПа составила ~36 мг/м.*

**Ключевые слова:** наноразмерный тугоплавкий наполнитель, керамические наночастицы, структурообразование, алюминиевый сплав, микротвердость, коэффициент трения, износостойкость

**Введение.** В машиностроении и других отраслях промышленности все более широкое применение находят алюминиевые сплавы, наиболее распространенными из которых являются сплавы алюминия с кремнием — силумины, что связано с их низким удельным весом и относительно невысокой стоимостью [1–4]. Вместе с тем гетерогенная структура этих сплавов, как правило, содержит грубые хрупкие включения кремния, крупные частицы железисто-медьсодержащих фаз, а также дендриты твердого раствора, вследствие чего для силуминов характерны сравнительно низкие прочностные свойства, что существенно сужает область их применения. Поскольку из-за малого различия по растворимости кремния при высоких и низких температурах силумины практически не упрочняются термической обработкой [1–4], важнейшим способом улучшения их механических свойств является модифицирование [5–10]. В ряде работ по этой тематике было показано, что наиболее эффективной объемной модификацией алюминий-кремниевых сплавов при создании алюмоматричных композиционных материалов (КМ) является введение в их расплавы тугоплавких высокомодульных керамических частиц типа AlN, TiB<sub>2</sub>, SiC, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> [6, 11–16]. Среди этих порошков широкое распространение в качестве армирующей добавки получил микропорошок корунда, при этом его количество варьируется

в диапазоне 5–30 мас. % [7, 11], а размер частиц находится в диапазоне 20–120 мкм [11–13]. В связи с низкой смачиваемостью  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> широко используется метод механического замешивания небольшими порциями [13, 18], что неэффективно.

Среди тугоплавких соединений особый интерес вызывает карбид титана, обладающий рядом с повышенными физико-механическими свойствами, смачиваемостью алюминиевыми расплавами. При охлаждении расплава частицы TiC могут служить центрами кристаллизации, а также формировать барьеры на пути растущих кристаллов алюминиевых сплавов, тормозя их рост в охлаждающемся расплаве. В результате действия обоих факторов измельчения структурных составляющих сплавов, частицы карбида титана обладают сильным модифицирующим действием, повышая прочностные и пластические свойства алюминиевых сплавов [12, 19, 20]. Обычно для получения алюмоматричных композиционных материалов используется микроразмерный порошок TiC [21]. Широкие возможности улучшения свойств силуминов открываются при их модифицировании наноразмерным порошком TiC, а также в его совместном применении с другими керамическими тугоплавкими соединениями, в частности, с  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такие композиционные керамические материалы (черная керамика) находят широкое применение в качестве инструментальных материалов [22, 23]. По-

лучение карбида титана в наносоостоянии открывает широкие перспективы его применения при создании комплексных порошковых керамических модификаторов нового типа, оказывающих эффективное воздействие на структуру и свойства алюминиевых сплавов различного состава.

Цель работы — разработка технологических подходов синтеза наноразмерного модификатора  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$ , исследование его влияния на структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства поршневого сплава АК12М2МгН.

**Методика эксперимента.** Синтез наномодификатора  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  осуществлялся газофазным осаждением непосредственно в шихте, включающей микропорошки диоксида титана, алюминия ПА-1 и наноуглерода. Для реализации химических реакций между элементами порошков шихты, приводящих к синтезу тугоплавких химических соединений, проводился ее нагрев под плавким затвором в восстановительной атмосфере аммиака и водорода. В качестве матричного сплава для получения композиционных материалов применяли эвтектический силумин АК12М2МгН (11–13 % Si, 1,5–3,0 % Cu, 0,8–1,3 % Mg, 0,5–0,8 % Mn, 0,4 % Fe, 0,2 % Zn, 0,02–0,10 % Ti, Al — остальные). Получение отливок КМ заключалось в расплавлении силумина в алундовом тигле в электрической камерной печи сопротивления типа СНОЛ. После достижения заданной температуры расплавом силумина на дно тигля способом «колокольчика» вводилась предварительно подогретая прессовка модификатора. Затем расплавленный металл выдерживался при температурах расплава в течение 5–10 мин, после чего с его поверхности снимался шлак и производилась заливка в металлический предварительно подогретый кокиль диаметром 25 мм. Из полученных отливок отрезались образцы толщиной 6 мм для исследования структуры и свойств модифицированного сплава. Для получения данных о степени воздействия модификатора  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  на структурообразование и свойства КМ в расплав его вводили с концентрациями 1 и 2 мас.%. Структурно-фазовое состояние синтезированного нанонаполнителя  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  и полученных с его использованием отливок исследовалось методами рентгеноструктурного, металлографического анализа и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Рентгеноструктурные исследования проводились на автоматизированном комплексе на базе дифрактометра ДРОН-3М в  $\text{Co-K}_\alpha$  излучении с применением вторичной монохроматизации рентгенового пучка. СЭМ выполнялась на приборе VEGA II TESCAN (Чехия) с использованием энергодисперсионной приставки типа InCa 350 Cambridge Instrument GB для элементного анализа. Металлографические исследования осуществлялись на микроскопах ХМ300 и МИМ-8, оснащенных цифровой регистрацией изображений.

Триботехнические испытания проводили в режиме граничного трения (масло И-40А) по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела из

закаленной стали 65Г (55 HRC) относительно неподвижного образца при скорости скольжения 0,1 м/с. При этом номинальное давление  $p$  пошагово возрастало по схеме 20 МПа → 30 → 40 МПа. Продолжительность испытаний на каждой ступени составляла 3–4 ч. По результатам испытаний определялись коэффициент трения  $f$ , массовый износ  $\Delta m$  и интенсивность изнашивания  $I_q$  ( $I_q = \Delta m/L$ , где  $L$  — путь трения). Потеря массы  $\Delta m$  образцом находилась его взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200. Микротвердость КМ определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,49 Н.

**Результаты и их обсуждение. Структура синтезированной модификации  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$ .** На рисунке 1 приведены дифрактограммы продуктов химической реакции между компонентами шихты в процессе термической обработки для двух составов, отличающихся соотношением масс исходных компонентов  $m_{\text{Al}}/m_{\text{TiO}_2}$ . Видно, что фазовый состав синтезируемого порошка представлен в основном карбидом титана и высокотемпературным оксидом алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , характеризующимся наиболее высокими физико-механическими свойствами. TiC имеет гранцентрированную кубическую решетку с параметром  $a = 0,43274$  нм, фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  — гексагональную решетку с периодами  $a = 0,4758$  нм,  $c = 1,2991$  нм. Характеристики обоих соединений соответствуют эталонным образцам.

При соотношении  $m_{\text{Al}}/m_{\text{TiO}_2} = 0,14$  в модификаторе  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  содержание TiC составляет 18 %,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  — 62 %. Увеличение  $m_{\text{Al}}/m_{\text{TiO}_2}$  до 0,40 приводит к росту содержания TiC до 27 % и снижению  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  до 50 % (см. рисунок 1 б). Наряду с TiC и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в синтезируемом порошке, как следует из рассматриваемых дифрактограмм, в небольшом количестве содержатся непрореагировавшие  $\text{TiO}_2$  и углерод. Основываясь на анализе профиля отражений карбида титана и корунда, можно заключить, что размер частиц синтезированных керамических соединений соответствует наноуровню. Это заключение подтверждается данными СЭМ (рису-

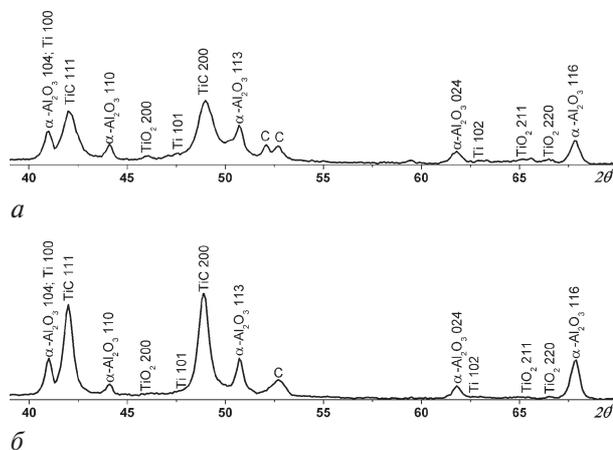
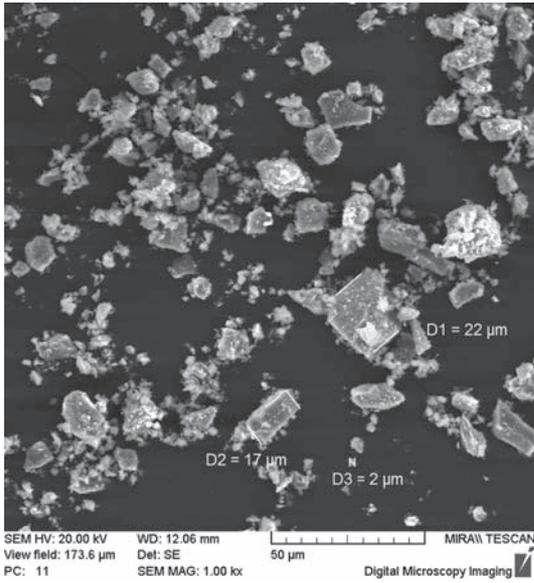
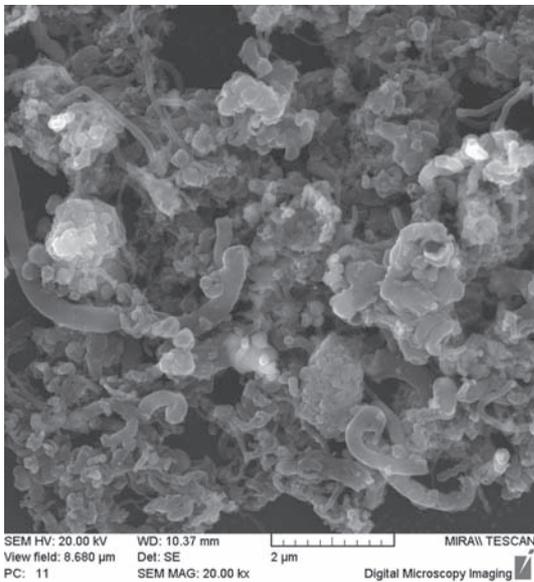


Рисунок 1 — Дифрактограммы синтезированных модификаторов при различном соотношении масс алюминия и диоксида титана: а — 0,14; б — 0,40



*a*



*б*

Рисунок 2 — СЭМ-изображения порошка  $\text{TiO}_2$  (*a*) и синтезированного нанонаполнителя  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  (*б*)

нок 2 *б*). Для сравнения на рисунке 2 *a* приведено СЭМ-изображение исходного микропорошка  $\text{TiO}_2$ . В отличие от него наночастицы  $\text{TiC}$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

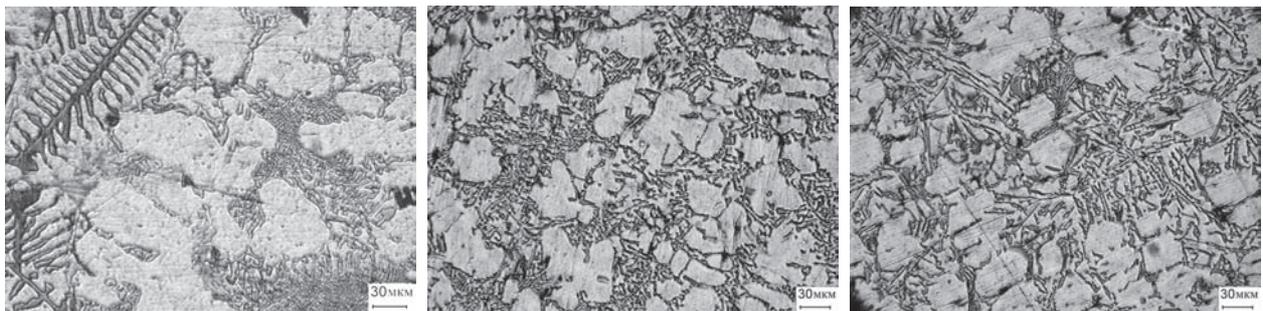
формируются в сферической форме, диаметром 50–80 нм, и в форме нановолокон, диаметром до 100 нм и длиной до 3 мкм.

**Структура и свойства КМ на основе силумина АК12М2МгН.** Исследуемый сплав имеет кубическую ГЦК-решетку, постоянная которой в исходном состоянии равна  $a = 0,404925$  нм, обладает гетерогенной грубодисперсной структурой (рисунок 3 *a*). Фазовый состав АК12М2МгН включает следующие фазы:  $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ ,  $\text{AlMnFeSi}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_3\text{Mg}_6$ ,  $\text{Al}_9\text{Mn}_3\text{Si}$ . Микротвердость  $\alpha$ -фазы в исходном состоянии составляет 920 МПа, эвтектики — 1180 МПа.

Включение в расплав этого сплава нанонаполнителя  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$  в количестве 1 % оказывает заметное воздействие на структурообразование сплава (см. рисунок 3 *б*). Прежде всего отмечается диспергирование структурных составляющих, при этом размеры дендритов снижаются в 2 раза, происходит сфероидизация частиц кремния эвтектики. При увеличении содержания нанонаполнителя до 2 % (см. рисунок 3 *в*) в структуре эвтектики появляются пластинчатые включения кремния при практически неизменной по сравнению с рисунком 3 *б* морфологией  $\alpha$ -фазы. Наличие твердых керамических наночастиц в расплаве способствует сфероидизации и уменьшению размеров интерметаллидных включений.

Результаты дюрOMETрического анализа показали, что включение наночастиц  $\text{TiC}$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в структуру силумина приводит к росту микротвердости. Величина  $H_c$  твердого раствора для концентрации модификатора 1 мас.% увеличивается до 970 МПа, эвтектики до 1420 МПа (в 1,2 раза и 1,5 раза соответственно). Эффект увеличения микротвердости структурных составляющих силумина в случае концентрации  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$ , равной 2 мас.%, несколько ниже. Здесь  $H_c$  для  $\alpha$ -фазы и эвтектики составляет 940 и 1370 МПа соответственно. На рисунке 4 представлены результаты фрикционных испытаний образцов отливок базового сплава и полученных композитов для нагрузок 20, 30, 40 МПа. При нагрузке 20 МПа (см. рисунок 4 *a*) коэффициент трения образца базового сплава на всех стадиях испытания превышает значения  $f$  модифицированного в 4–8 раз (кривые 2, 3).

Увеличение нагрузки до 30 МПа сопровождается резким возрастанием коэффициента трения



*a*

*б*

*в*

Рисунок 3 — Микроструктура исходного (*a*) и модифицированного (*б, в*) сплава: *б* — 1 %; *в* — 2 мас.% модификатора  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$

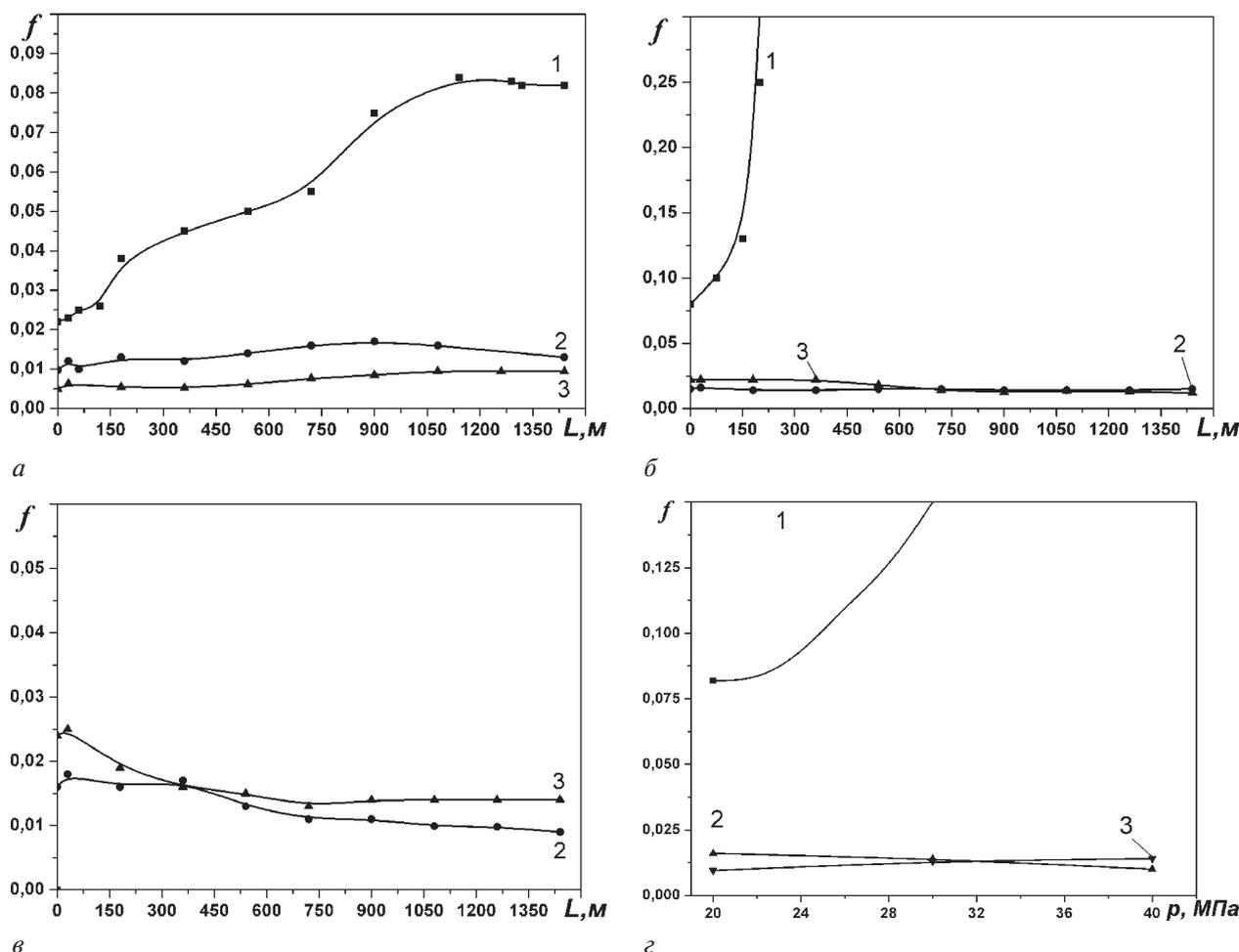


Рисунок 4 — Зависимость коэффициента трения образцов базового сплава (кривая 1) и модифицированного наполнителем TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с концентрацией 1 мас.% (кривая 2), 2 мас.% (кривая 3), испытанных при нагрузках 20 МПа (а), 30 МПа (б), 40 МПа (в) от продолжительности испытания (а, б, в) и давления (з)

базового сплава, что указывает на переход в стадию катастрофического изнашивания. Что же касается композитов, то значения коэффициента трения составляет  $\sim 0,02$  (см. рисунок 4 б). Для нагрузки 40 МПа после пути трения  $L = 380$  м более низкие значения коэффициента трения регистрируются для композита, в расплав которого нанонаполнитель TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> включался с концентрацией 1 мас.% (см. рисунок 4 в, кривая 2).

Таким образом, на основании полученных результатов можно заключить, что более высокие прочностные и антифрикционные свойства созданных композитов достигаются при пониженной концентрации (1 мас.%) карбидо-корундового наполнителя. Что же касается сопротивления изнашиванию, то износ полученных композитов не был обнаружен, тогда как интенсивность изнашивания образца базового сплава составила  $\sim 36 \cdot 10^{-4}$  мг/м.

**Заключение.** Разработаны научно-методологические принципы синтеза наноразмерного тугоплавкого комплексного наполнителя, включающего керамические частицы карбида титана и корунда. На основе микропорошков диоксида титана и алюминия синтезированы нанонаполнители двух составов:

18% TiC-62%  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 27% TiC-50%  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Проведены исследования по модифицированию сплава АК12М2MgH этими наполнителями при их концентрациях в расплаве 1 и 2 мас.%. Установлено что у композитов, полученных при включении в их структуру 1 мас.% комплексного керамического наномодификатора достигается значительное повышение износостойкости (износ не обнаружен) и снижение коэффициента трения в 4–8 раз. Показано, что интенсивность изнашивания базового образца при нагрузке 20 МПа составляет  $36 \cdot 10^{-4}$  мг/м.

#### Список литературы

1. Металловедение алюминия и его сплавов / Н.Н. Буйнов [и др.]; отв. ред. И.Н. Фридляндер. — 2-е изд., пер. и доп. — М.: Металлургия, 1983. — 522 с.
2. Строганов, Г.В. Сплавы алюминия с кремнием / Г.В. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. — М.: Металлургия, 1977. — 272 с.
3. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо; пер. с англ. — М.: Металлургия, 1979. — 640 с.
4. Мальцев, М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М.В. Мальцев. — М.: Металлургия, 1970. — 368 с.
5. Боом, Е.А. Природа модифицирования сплавов типа силумин / Е.А. Боом. — М.: Металлургия, 1972. — 70 с.
6. Комаров, А.И. Синтез наноструктурированных тугоплавких наполнителей, их влияние на структуру и свойства си-

- луминов / 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.
7. О модифицировании литых алюмоматричных композиционных материалов тугоплавкими наноразмерными частицами / Т.А. Чернышова [и др.] // Металлы. — 2009. — № 1. — С. 79–87.
  8. Влияние фазового состава наноструктурированного тугоплавкого модификатора на структуру и триботехнические свойства сплава АК12М2МгН / П.А. Витязь [и др.] // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 5. — С. 435–445.
  9. Создание наноструктурированных композиционных модификаторов для сплавов алюминия / П.А. Витязь [и др.] // Докл. НАН Беларуси. — 2011. — Т. 55, № 5. — С. 91–99.
  10. Крушенко, Г.Г. Модифицирование алюминиевых сплавов нанопорошками / Г.Г. Крушенко, М.Н. Фильков // Нанотехника. — 2007. — Т. 12, № 4. — С. 38–44.
  11. Grosh, Sh. Wear behavior of Al-SiCp metal matrix composites and optimization using Taguchi method and grey relational analysis / Shouvik Ghosh, Prasanta Sahoo, Goutam Sutradhar // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. — 2012. — Vol. 11. — Pp. 1085–1094.
  12. Forming behavior of Al-TiC in-situ composites / Ram Naresh Rai [et al.] // Materials Science Forum. — 2013. — Vol. 765. — Pp. 418–422.
  13. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites / G.B. Verresh Kumar [et al.] // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. — 2010. — Vol. 9, No. 1. — Pp. 43–55.
  14. Microstructure and mechanical properties of Al7075-TiB<sub>2</sub> in-situ composite / R. Keshavamurthy [et al.] // Research Journal of material sciences. — November, 2013. — Vol. 1(10). — Pp. 6–10.
  15. Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy-alumina-boron carbide metal matrix composites / B. Vijaya Ramanath [et al.] // Materials and Design. — 2014. — Vol. 58. — Pp. 332–338.
  16. Cun-Zhu Nie Production of Boron Carbide reinforced 2024 aluminum matrix composites by mechanical alloying / Cun-Zhu Nie, Jia-Liang Liu, Di Zhang // Materials Transactions. — 2007. — Vol. 48, No. 5. — Pp. 990–995.
  17. Aluminium metal matrix composites — a review / B. Vijaya Ramanath [et al.] // Rev. Adv. Mater. Sci. — 2014. — Vol. 38. — Pp. 55–60.
  18. Wear behaviour of Al-SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix composites sliding against automobile friction material / P.R.K. Fu [et al.] // PCO Proceeding 2013 based on AIP Guide. — 2013. — Vol. 2008. — Pp. 249–253.
  19. 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.
  20. Microstructure and heat-treatment response of Al-2024 / TiC composites / A. Albitar [et al.] // Materials Science and Engineering. — 2000. — Vol. 289A. — Pp. 109–115.
  21. 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.
  22. Самсонов Г.В. Тугоплавкие соединения: справ. / Г.В. Самсонов, И.М. Винницкий. — М.: Металлургия, 1976. — 560 с.
  23. Матренин, С.В. Техническая керамика: учеб. пособие / С.В. Матренин, А.И. Слосман. — Томск: Изд-во ТПУ, 2004. — 75 с.

KOMAROV Aleksandr I., Cand. Techn. Sc.

Head of the Sector of Metallurgy and Magnetic Structurescopy of Steel and Alloys<sup>1</sup>

E-mail:al\_kom@tut.by

KOMAROVA Valentina I., Cand. Phys.-Math. Sc., Associate Professor

Leading Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering<sup>1</sup>

ORDA Dmitriy V.

Junior Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Engineering<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences, Minsk, The Republic of Belarus

Received 05 November 2015.

## SYNTHESIS OF CARBIDE-CORUND FILLER AND ITS IMPACT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PISTON GK-AISi12(Cu) ALLOYS

*The synthesis of carbide-corundum filler based on titanium oxide by the method of chemical vapor deposition in a reducing atmosphere of ammonia and hydrogen has been investigated. The data analysis shows that the synthesized filler includes nanoscale high-melting compounds — carbide titanium and corundum. It is shown that the introduction of 1 wt.% of this nanofiller is accompanied by the dispersion of the structural components of the alloy not less than 2 times, it provides the microhardness increase of the  $\alpha$ -phase by 1,5 times and eutectic by 2 times, the coefficient of friction decrease by 4–8 times, multiple increase of wear resistance of the composites obtained, due to the lack of wear of samples of castings for the entire test cycle of the obtained composites, whereas wear rate of the sample from GK-AISi12(Cu) alloy at a load of 20 MPa was ~36 mg/m.*

**Keywords:** nanosized refractory filler, ceramic nanoparticles, structure, aluminum alloy, micro-hardness, friction coefficient, wear resistance

## References

1. Fridljander I.N. *Metallovedenie aljuminija i ego splavov* [Metallurgy aluminum and its alloys]. Moscow, Metallurgy, 1983. 522 p.
2. Stroganov G.V., Rosenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy aljuminija s kremniem* [Aluminum alloys with silicon]. Moscow, Metallurgy, 1977. 272 p.
3. Mondolfo L.F. *Struktura i svojstva aljuminievyh splavov: per. s angl.* [Structure and properties of aluminum alloys: translation from English]. Moscow, Metallurgy, 1979. 640 p.
4. Maltsev M.V. *Metallografija promyslennyh cvetnyh metallov i splavov* [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgy, 1970. 368 p.
5. Boom E.A. *Priroda modifirovaniya splavov tipa silumin* [The nature of the modification type alloys silumin]. Moscow, Metallurgy, 1972. 70 p.
6. Komarov A.I. Sintez nanostrukturirovannyh tugoplavkih napolnitelej, ih vlijanie na strukturu i svojstva siluminov [Synthesis of nanostructured refractory fillers, their influence on the structure and properties of silumins]. *Perspektivnye materialy i tehnologii: monografija v 2 t.* [Advanced materials and technologies: monograph in 2 volumes]. Vitebsk, UO "VSTU", 2015, vol. 2, part 12, pp. 202–223.
7. Chernysheva T.A., Soboleva L.I., Kalashnikov I.E., Bolotov L.K. O modifirovanii lityh aljumomatricznych kompozicionnyh materialov tugoplavkimi nanorazmernymi chasticami [About the modification of cast aluminum-matrix composites refractory nanoparticles]. *Metally* [Metals], 2009, no. 1, pp. 79–87.
8. Vityaz P.A., Komarov A.I., Komarova V.I., Shipko A.A., Ovchinnikov V.V., Kovaleva S.A. Vlijanie fazovogo sostava nanostrukturirovannogo tugoplavkogo modifika-tora na strukturu i tribotekhnicheskie svojstva splava AK12M2MgN [The effect of the phase composition of nanostructured refractory modifier on the structure and tribological properties of the alloy AK12M2MgN]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2013, vol. 34, no. 5, pp. 435–445.
9. Vityaz P.A., Komarov A.I., Komarova V.I., Shipko A.A., Senjut V.T. Sozdanie nanostrukturirovannyh kompozicionnyh modifikatorov dlja splavov aljuminija [Creating nanostructured composite modifiers for aluminum alloys]. *Dokl. NAN Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences], 2011, vol. 55, no. 5, pp. 91–99.
10. Krushenko G.G., Filkov M.N. Modifirovanie aljuminievyh splavov nanoporoshkami [Modification of aluminum alloy nanopowders]. *Nanotekhnika* [Nanotechnics], 2007, vol. 12, no. 4, pp. 38–44.
11. Shouvik Ghosh, Prasanta Sahoo, Goutam Sutradhar. Wear behavior of Al-SiCp metal matrix composites and optimization using Taguchi method and grey relational analysis. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2012, vol. 11, pp. 1085–1094.
12. Ram Naresh Rai [et al.]. Forming behavior of Al-TiC in-situ composites. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 765, pp. 418–422.
13. Verresh Kumar G.B. [et al.]. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 43–55.
14. Keshavamurthy R. [et al.]. Microstructure and mechanical properties of Al7075-TiB<sub>2</sub> in-situ composite. *Research Journal of material sciences*, 2013, vol. 1(10), pp. 6–10.
15. Vijaya Ramnath B. [et al.]. Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy-alumina-boron carbide metal matrix composites. *Materials and Design*, 2014, vol. 58, pp. 332–338.
16. Cun-Zhu Nie, Jia-Liang Liu, Di Zhang Production of Boron Carbide reinforced 2024 aluminum matrix composites by mechanical alloying. *Materials Transactions*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 990–995.
17. Vijaya Ramnath B. [et al.]. Aluminium metal matrix composites – a review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 2014, vol. 38, pp. 55–60.
18. Fu P.R.K. [et al.]. Wear behaviour of Al-SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix composites sliding against automobile friction material. *PCO Proceeding 2013 based on AIP Guide*, 2013, vol. 2008, pp. 249–253.
19. Verresh Kumar G.B., Rao C.S.P., Selvaraj N. Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites – a review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2011, vol. 10, no. 1, pp. 59–91.
20. Albiter A. [et al.]. Microstructure and heat-treatment response of Al-2024/TiC composites. *Materials Science and Engineering*, 2000, vol. 289A, pp. 109–115.
21. Mikheev R.S., Chernyshova T.A. *Aljumomatriczne kompozicionnye materialy s karbidnym uprochneniem dlja reshenija zadach novoj tehniki* [Aluminum-matrix composites with carbide reinforcement to meet the challenges of new technology]. Moscow, company CPI "Mask", 2013. 356 p.
22. Samsonov G.V., Vinitsky I.M. *Tugoplavkie soedinenija: Spravochnik* [Refractory compounds: Reference]. Moscow, Metallurgy, 1976. 560 p.
23. Matrenin S.V., Slosman A.I. *Tekhnicheskaja keramika: Uchebnoe posobie* [Technical ceramics: Textbook]. Tomsk, Publishing house TPU, 2004. 75 p.