

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА ЛИГАТУРАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ УГЛЕРОДНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Д.В. Куис¹, А.Т. Волочко², А.А. Шегидевич², Н.А. Свидунович¹,
А.В. Омелюсик¹, С.Н. Лежнев³

¹ Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь, dmitrykuis@mail.ru

² Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³ Карагандинский государственный индустриальный университет,
г. Темиртау, Казахстан

Приведены результаты исследования структурного состояния и свойств алюминиевых композитов, полученных с использованием лигатур Al-C.

В настоящее время особое внимание уделяется новым быстро развивающимся направлениям, имеющим в перспективе широкое практическое применение, что в полной мере относится к исследованиям и разработкам в области получения материалов с повышенными физическими, механическими и эксплуатационными свойствами. Это обстоятельство обеспечило постоянно возрастающий интерес к композиционным материалам на металлической основе и, в частности, к литым алюминиевым композитам с модифицированной структурой и упрочненным различными наполнителями.

В данном исследовании предпринята попытка оценить возможность использования смешанных наночастиц углерода (фуллереновая сажа, фуллереновая чернь) для получения необходимых свойств алюминиевого композита.

Для получения литого композита использовали основу – алюминий-кремниевый сплав марки АК9, обработанный лигатурой. Расплав готовили в индукционной печи ИСВ 0,004.

Лигатуры, содержащие 10 мас.% углерода, вводили в расплав АК9 при температуре 750–780 °С, время их расплавления составило 3–5 мин. Количество вводимой лигатуры в алюминиевый расплав рассчитывалось из условия 1 мас.% углерода в композите.

Для получения лигатур использовали в качестве металлической матрицы измельченную стружку алюминий-кремниевое сплава АК9 и углеродосодержащее сырье в виде фуллереновой сажи (ФС), фуллереновой черни (ФЧ), фуллеренов C_{60} (Ф) и микрокристаллического графита (Гр) (для сравнения) в соотношении А1 – до 10 мас.% С в исходной смеси.

Технология получения лигатуры включала: механоактивационную обработку исходных материалов в планетарной мельнице, компактирование в жестких пресс-формах и горячее экструдирование. Механоактивационную обработку проводили 30–40 мин при частоте вращения центрального вала 400–600 об/мин при соотношении массы мелющих тел к массе загружаемых компонентов 20:1. Механоактивированные порошки компактировали в таблетки при $P = 450$ МПа. Далее таблетки экструдировали при температуре 450–500 °С с коэффициентом вытяжки ≥ 10 и получали лигатуру в виде прутков.

Методами рентгеноструктурного анализа, световой, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии с системой качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа, Рамановской спектроскопии, исследовано структурное состояние композитов на каждом этапе их получения. Показатели механических свойств определяли стандартными методами. Антифрикционные свойства литых алюмоматричных композитов исследовали на машине трения УМТ 2 по схеме «диск–палец». В качестве контртела использовали сталь 40Х (≥ 45 HRC).

Исследование структуры алюминиевых лигатур, где в качестве исходных добавок использовали наноструктурированный углерод в виде Ф, ФС и ФЧ, выявило необычные частицы серого цвета (20–200 мкм) (рис. 1).

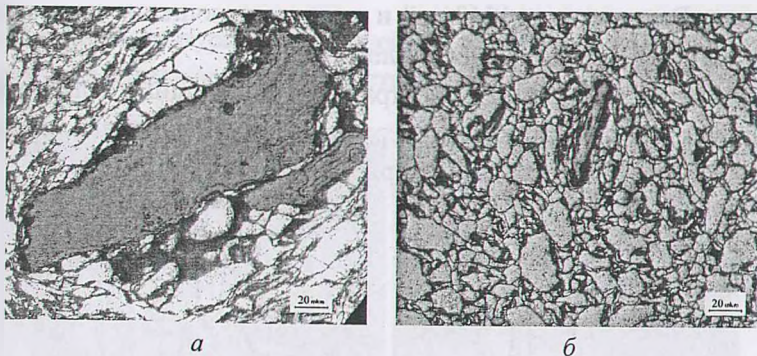


Рис. 1. Структура образцов лигатур Al-Si-C: *а* – Al-Si + 10% ФЧ, $\times 500$; *б* – Al + 10% ФС, $\times 500$

Исследование данных частиц показало, что измерить твердость стандартными методами не представляется возможным, так как алмазная пирамидка не оставляет на них отпечатка или съезжает на мягкую алюминиевую основу. Рентгенофазовый анализ показал, что эти частицы не могут быть идентифицированы как карбиды. Вместе с тем микрорентгеноспектральным анализом EDX установлено, что эти частицы являются углеродными. Картина микродифракции серой частицы представляет собой два размытых кольца Лауэ, соответствующих первой и второй сферам углерода, свидетельствующих о полном разупорядочении, т. е. аморфном состоянии данной частицы [1].

Как отмечалось ранее, такие частицы содержат все изготовленные с наноструктурированным углеродом лигатуры – с ФС, ФЧ и Ф. При этом исследования не выявили принципиальных отличий в структурообразовании лигатур Al-Si-C, полученных с использованием дорогостоящего фуллера более дешевых наноструктурированных материалов (ФЧ, ФС), что делает их перспективными для промышленного освоения.

Исследования на спектрометре комбинационного рассеяния света RAMANOR U-1000C показали, что спектр, полученный при изучении сверхтвердой углеродной частицы, представляет собой два характерных узких неперекрывающихся пика в области $1340, 1580 \text{ см}^{-1}$. Это подтверждает данные о разупорядочении – аморфизации серых фаз.

Положение D-линии $\nu_d = 1340 \text{ см}^{-1}$ и высокое отношение интенсивностей I_d/I_g типично для аморфного углерода [2].

Сравнение полученного спектра с существующими в литературе примерами дало возможность утверждать, что полученные частицы наиболее близки к стеклоуглероду (рис. 2).

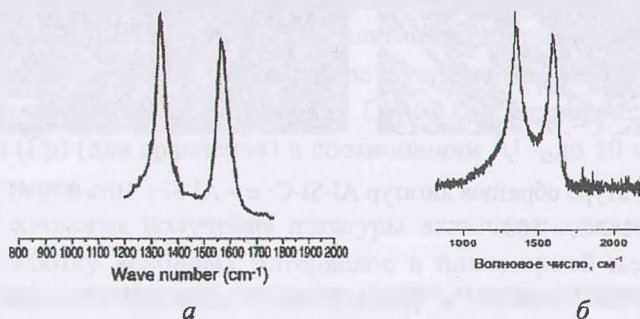


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеивания света: *а* – стеклоуглерод [3]; *б* – образец АК9 + 10 % С

Исследования показали, что при обработке алюминиевого расплава лигатурами с синтезированными стеклоуглеродоподобными частицами наблюдается существенное изменение структуры сплава основы, а следовательно, и его свойств. Одновременно с этим при введении лигатуры с Гр таких изменений нет.

Сплав АК9 в исходном состоянии характеризуется резкой неоднородностью структуры и включает α -твердый раствор, эвтектику и ряд достаточно крупных интерметаллидных (15–30 мкм) фаз (рис. 3, *а*, *в*). Дендриты также достаточно крупные и их размер находится в диапазоне 50–200 мкм. Твердость сплава составляет 70 НВ. При введении в расплав матричного сплава лигатуры со стеклоуглеродоподобными частицами из расчета содержания в сплаве 1 мас.% углерода формируется композит, структура которого значительно отличается от исходного сплава. Это проявляется в диспергировании всех структурных составляющих композиционного материала (рис. 3, *б*, *в*). Структура характеризуется высокой дисперсностью, при этом она более однородна и равномерна по сравнению с исходной, а дендриты α -фазы слабо выражены. Твердость этого композита в литом состоянии составляет более 100 НВ. Одновременно с

При этом введение лигатуры, содержащей Гр, в расплав никак не отразилось на структуре сплава-основы и свойствах в целом.

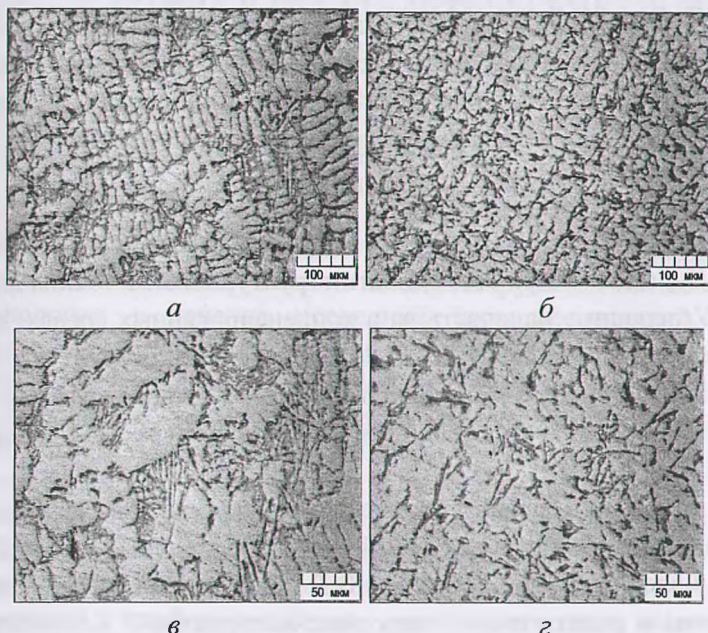


Рис. 3. Микроструктура сплава: а, в – исходного силумина АК9; б, г – литого композита с использованием лигатуры

Проведенные триботехнические испытания показали, что введение в расплав стеклоподобных углеродных частиц способствует снижению интенсивности изнашивания в сравнении с исходным – матричным сплавом. Так, использование микрокристаллического графита позволяет снизить интенсивность изнашивания до $I_m = 7,1 \cdot 10^{-3}$ мг/м, что обеспечивает повышение износостойкости этого композита в 3 раза по сравнению с матричным сплавом. Еще более выраженный эффект повышения износостойкости (более чем 5 раз) наблюдается при использовании лигатур со стеклоподобными углеродными частицами, при этом интенсивность изнашивания получаемых композитов находится в пределах $I_m = 4,2-4,7 \cdot 10^{-3}$ мг/м.

Таким образом, поэтапно изучены структурное состояние и свойства литых алюминиевых композитов, полученных с применением ультрадисперсного углеродсодержащего сырья. Такие материалы могут найти широкое применение при создании объектов новой техники, отличающихся высокими техническими характеристиками, в частности, для прецизионных деталей машиностроения, изделий, работающих на трение при повышенных нагрузочно-скоростных условиях.

Литература

1. Куйс Д.В. и др. Особенности структурного состояния лигатур Al-C // Углеродные наночастицы в конденсированных средах: сб. науч. статей VII Междунар. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» и III школы-семинара «Наноструктуры и наноматериалы: теоретические и прикладные аспекты», 9–12 июня 2013 г. Минск. С. 120-126.
2. Chu, L.Li. Characterization of amorphous and nanocrystalline carbon films // Materials Chemistry and Physics. 2006. Vol. 96. Pp. 253–277.
3. Беленков Е.А., Ивановская В.В., Ивановский А.Л. Гибридные наноалмазы и родственные углеродные материалы. // Компьютерное моделирование. Екатеринбург, 2008.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITES OBTAINED BY TREATING MOLTEN ALUMINUM LIGATURES CONTAINING CARBON PARTICLE

D.V. Kuis¹, A.T. Volochko², A.A. Shegidevich², N.A. Svidunovich¹,
A.V. Omelusik¹, S.N. Legnev³

¹ Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

² Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³ Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

This work contains the results of a study of the structural state and properties of aluminum composites produced using alloys Al-C.