

УДК 669.24/29.018:[539/25+539/26]

Д. В. Куис, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);
Н. А. Свидунович, доктор технических наук, профессор (БГТУ);
Г. П. Окатова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (БГТУ);
А. П. Ласковнев, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент,
заместитель директора (ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»)

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЙ-МЕДНОГО СПЛАВА И УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ

В работе приведены результаты исследования структурообразования нанокompозита на основе алюминий-медного сплава микролегированного фуллереном C_{60} путем использования фуллеренсодержащей сажи.

This work contains research results of nanocomposite on the aluminum-copper alloy base microalloying fullerene C_{60} with utilization fullerenes soot.

Введение. Актуальной проблемой современного материаловедения является поиск составов с использованием наноматериалов для разработки новых материалов, обладающих физическими свойствами, обеспечивающими потребности современной техники.

Исследования сверхмелкозернистых материалов показали [1], что уменьшение размера кристаллитов ниже некоторой пороговой величины может приводить к значительному изменению свойств. Размерные эффекты появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зерен менее 10 нм. Таким образом, размер частиц является одним из наиболее важных параметров, определяющих специфику свойств и область применения наноматериала.

Физически осмысленное определение наносостояния требует более глубокого понимания проблемы. С физической точки зрения переход к наносостоянию связан с проявлением размерных эффектов на свойствах. Пока нет размерных эффектов – нет и наносостояния. Действительно, если размеры твердого тела по одному, двум или трем направлениям соизмеримы или меньше, чем характерный корреляционный масштаб того или иного физического явления или физический параметр, используемый в теоретическом описании какого-либо свойства или процесса и имеющий размерность длины, то на соответствующих свойствах будут наблюдаться размерные эффекты.

В работе исследовали структурообразование нанокompозита на основе алюминий-медного сплава и углеродных наночастиц (фуллереносодержащей сажи). Работу выполняли в направлении поиска возможности микролегирования фуллереном графита в алюминий-медь-графитовом материале путем использования фуллеренсодержащей сажи с целью повышения прочностных характеристик подшипников скольжения, не уступающих харак-

теристикам изделий, изготовленных из наиболее стойких антифрикционных бронз [2].

Фуллерены близкие родственники графита и в этой связи наследуют его высокую термостойкость, неординарные электрофизические характеристики, а также широко известные для графита антифрикционные свойства.

Образцы Al-Cu-фуллеренсодержащая сажа готовили по специальной литейно-деформационной технологии.

Фуллеренсодержащую сажу с содержанием фуллерена C_{60} 1 и 10% добавляли из расчета введения фуллеренов 0,02–1,1% с использованием эффекта «фуллереновой гомеопатии» [3]. Медь вводилась в количествах 5,4 и 7,4%.

Для получения образцов смешивали порошки Al, Cu и фуллереновой сажи в течение 4 ч в смесителях типа «пьяная бочка». Из полученной шихты были спрессованы цилиндрики высотой 24 мм и диаметром 36 мм. Эти цилиндрики (брикеты) нагревали до температуры 550°C, выдерживали при этом 30 мин (чтобы прореагировали Cu и Al) и прессовали выдавливанием на кривошипном прессе со скоростью осадки 500 мм/сек на диаметр 14 мм. Всего было подготовлено 7 образцов (таблица), два из которых с содержанием 1,07% фуллерена (образец 7) и 0,107% фуллерена (образец 4) были подробно исследованы. Микроструктуру исследовали на микрошлифах с применением металлографического комплекса, включающего световой микроскоп МИ-1, цифровую камеру с фотоадаптером, фазовый состав и текстурованность определяли на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-3,0 в CuK_{α} монохроматизированном излучении с использованием программ «X-RAY» автоматизации рентгенофазового анализа, по структурным составляющим измеряли микротвердость на микротвердомере Duramin Struers.

Исследованием выявили существенные различия в состоянии образцов 7 и 4.

Составы образцов сплавов системы Al-Cu-фуллереносодержащая сажа

№ образца	Вид образца	Содержание фуллерена		Содержание в шихте, %			
		в фуллереновой саже, %	в навеске, г	фуллерена	C (сажа)	Cu	Al
1	Al-Cu	1	0,9	0,019	1,9	5,37	92,71
2	Al-Cu	1	1,0	0,020	2,1	7,37	90,51
3	Al-Cu	1	4,0	0,084	8,42	7,37	84,13
4	Al-Cu	1	5,0	0,107	10,6	5,37	83,92
5	Al-Cu	10	1,0	0,215	2,15	5,37	92,27
6	Al-Cu	10	2,5	0,500	5,37	5,37	88,76
7	Al-Cu	10	5,0	1,070	9,7	5,37	83,86

При комплексном исследовании образца 7 (Al – 5,37% Cu + сажа + 1,07% фуллерена) получили следующие результаты:

– образец рекристаллизован, зерна имеют обычную для рекристаллизованного состояния округлополиэдрическую форму (рис. 1, а);

– по границам зерен располагается эвтектика (рис. 1, б), в структурные составляющие эвтектики внедрились частицы сажи и фуллеренов, в структуре встречаются частицы меди;

– наличие эвтектики свидетельствует об оплавлении образца, что вполне объяснимо, т.к. концентрация Cu 5,37% близка к ее максимальной растворимости в системе Cu-Al, температура нагрева образцов перед выдавливанием в соответствии с диаграммой состояния Al-Cu равна температуре плавления эвтектики, плюс экзотермическая активность смеси Al-C;

– микротвердость внутри зерен ~900 МПа, по границам зерен с эвтектикой ~1500 МПа, по границам зерен с частицами сажи и фуллеренов от 1400 до 3000 МПа, имеются отдельные значения ~2400 МПа (рис. 2);

– по результатам полуколичественного рентгенофазового анализа получен следующий фазовый состав образца 7: CuAl₂ – 10,3%; AlCu – 5,3%; Al₂O₃ – 0,9%; C₆₀ – 2,3%;

CuAlO₂ – 0,8%; Graphite – 7,8%; Cu – 1,8%; Al – 65,4%.

С другой стороны при изучении образца 4 (Al – 5,4% Cu + сажа + 0,107% фуллерена) определено:

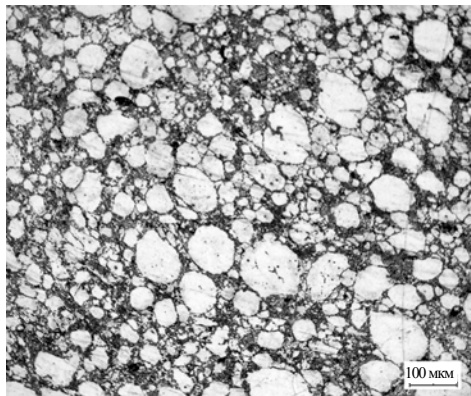
– образец не рекристаллизован, зерна вытянуты в направлении деформации (рис. 3, а);

– по границам и внутри зерен располагаются, часто широкими полосами, фазы тонкого зернистого строения светлые, серого и черного цвета, в структурные составляющие которых внедрились частицы сажи, фуллеренов и карбида алюминия – Al₄C₃ (рис. 3, б, 5, а), частицы меди практически не встречаются;

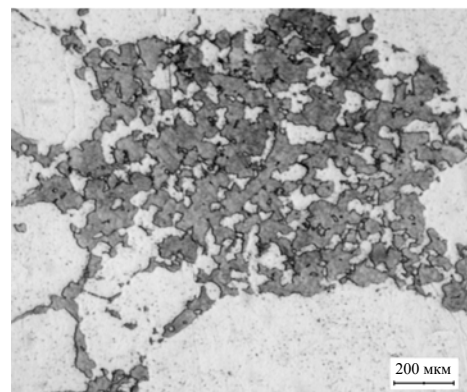
– рентгеновская съемка, проведенная в двух сечениях вдоль и поперек деформации, выявила текстурированность в продольном направлении (рис. 4, б);

– микротвердость внутри зерен ~1000 МПа, по границам зерен в зависимости от цвета частиц микротвердость изменяется в пределах 1500–2200–5250 МПа (рис. 5);

– фазовый состав в образце 4 (определялся на поперечном образце без выявления текстуры: Al₂C₆O₁₂ – 5,6%; Al₂O₃ – 2,7%; Al₂OC – 0,8%; Al₄C₃ – 2,0%; Al – 73,8%; Cu₂O – 1,8%; CuAl₂ – 1,4%; Cu – 0,4%; C₆₀ – 1,0%; Graphite – 7,1%.



а



б

Рис. 1. Микроструктура образца 7 (продольное сечение): Al – 5,4% Cu + фуллереновая сажа – 9,7%, фуллерен – 1,07%

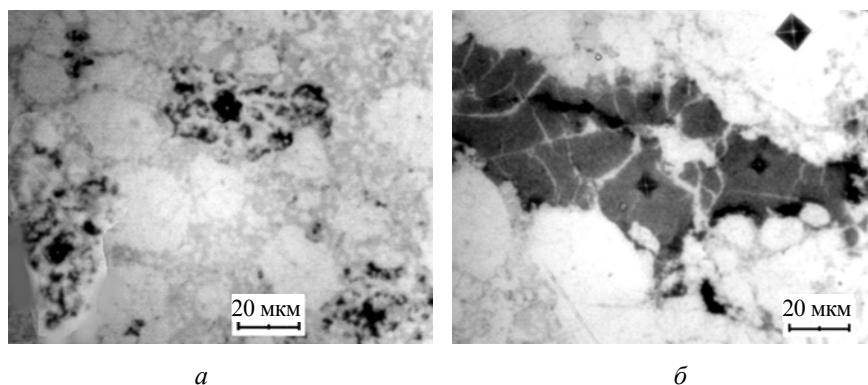


Рис. 2. Микроструктура образца 7 (продольное сечение) с отпечатками микротвердости: *а* – $H_m = 2680, 3560$ МПа в эвтектике с частицами черной фазы; *б* – $H_m = 1760, 2350$ МПа в частицах с дисперсной структурой фазы серого цвета, $H_m = 1004$ МПа основы

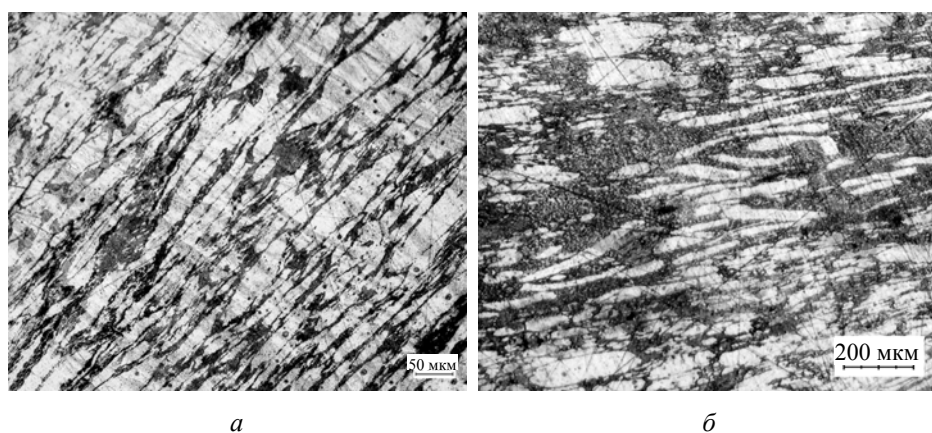


Рис. 3. Микроструктура образца 4 (продольное сечение): Al – 5,4% Cu + фуллереновая сажа – 10,6%, фуллерен – 0,107%

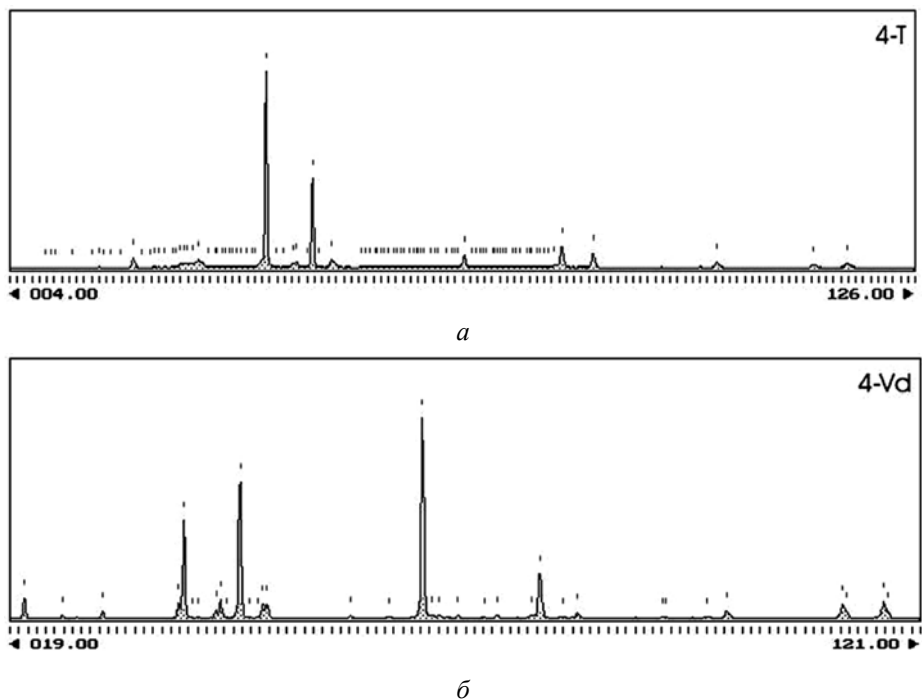


Рис. 4. Рентгенограммы образца 4: *а* – съемка поперечного сечения; *б* – съемка продольного сечения с явными признаками текстуры деформации

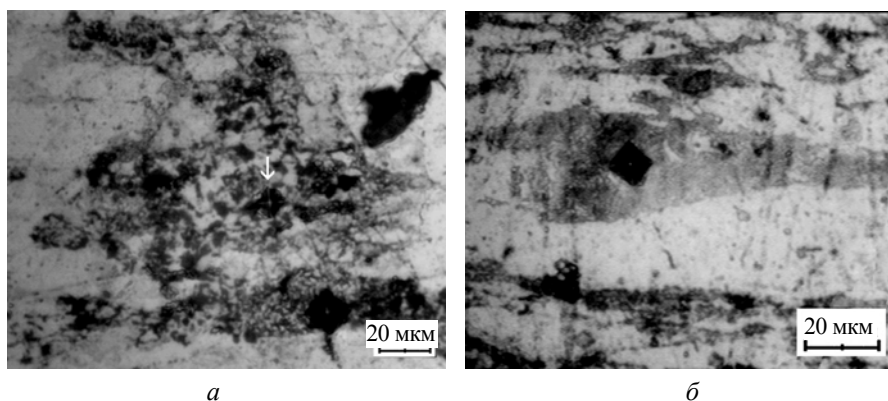


Рис. 5. Микроструктура образца 4 (продольное сечение) с отпечатками микротвердости:
 а – $H_m = 2460$ МПа, серые и черные частицы в светлой тонкого строения фазе;
 б – $H_m = 2550$ МПа в широкой полосе фазы серого цвета с дисперсной структурой

Как видно из приведенных результатов исследований, в отличие от образца 4 образец 7 не содержит карбида Al_4C_3 . В результате изготовления и исследования нанокompозита на основе алюминий-медного сплава и углеродных наночастиц (фуллереносодержащей сажи).

Выявили следующие существенные различия в состоянии образцов с разным количеством введенных фуллеренов при одинаковых условиях их изготовления:

- в образце с содержанием 1,07% фуллеренов C_{60} в содержащей их саже в процессе изготовления прошла рекристаллизация и даже оплавление с образованием эвтектики, от обычного состояния этот образец отличается наличием в эвтектике внедренных частиц сажи и фуллеренов, а также частиц меди; микротвердость внутри зерен ~ 900 МПа, по границам зерен с эвтектикой ~ 1500 МПа, по границам зерен с частицами сажи и фуллеренов от 1400 до 3000 МПа;

- в образце с содержанием фуллеренов на порядок меньше – 0,107%, не прошла рекристаллизация – зерна вытянуты в направлении деформации, вместо эвтектики по границам и внутри зерен располагаются частицы фазы тонкого зернистого строения с внедренными частицами сажи, фуллеренов и карбида алюминия – Al_4C_3 , частицы меди практически не встречаются; микротвердость внутри зерен ~ 1000 МПа, по границам зерен в зависимости от цвета частиц микротвердость изменяется в пределах 1500–2200–5250 МПа;

- в образце с содержанием фуллеренов на порядок больше – 1,07%, не произошло образование карбида алюминия Al_4C_3 , который выявлен в образце с малой добавкой фуллеренов.

Заключение. В проведенной работе установлено положительное влияние малых добавок фуллерена на структурообразование алюминий-медного графитового сплава (повышается температура рекристаллизации, образуется

карбид алюминия, повышается микротвердость структурных составляющих).

Установлена возможность получения алюминий-медно-углеродного сплава микролегированием фуллереном C_{60} путем использования фуллереносодержащей сажи.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности повысить температуростойкость и прочностные характеристики деталей из композиционных алюминий-графитовых материалов для узлов трения со свойствами, аналогичными свойствам антифрикционных бронз.

Литература

1. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.
2. Структура и свойства алюминий-медно-графитового сплава при микролегировании фуллереном C_{60} / Г. П. Окатова [и др.] // Современные проблемы металловедения сплавов цветных металлов: сборник трудов Межд. науч.-техн. конф., Москва, 1–2 октября 2009 г. – М.: МИСиС, 2009. – С. 361–368.
3. Okatova, G. P. Research by methods of a microscopy, microhardness and X-ray diffraction analysis of influence of the small components fullerene C_{60} on a degree of a crystalline and micro condition of polyethylene and polypropylene / G. P. Okatova, N. A. Svidunovich // Abstracts VII International conference «Hydrogen materials science and chemistry of metal hydrides», Alushta. – 2001. – P. 540–543.
4. Окатова, Г. П. Изменение кристаллической структуры и свойств полимерных материалов при микролегировании фуллереном C_{60} / Г. П. Окатова, Н. А. Свидуневич // Российский химический журнал. Раздел «Новые направления использования углеродных материалов». – 2006. – Т. L, № 1. – С. 68–70.

Поступила 02.03.2011