



Positive influence of small additives of fullerene on structure formation of aluminium-copper graphite alloy is determined.

Н. А. СВИДУНОВИЧ, Д. В. КУИС, Г. П. ОКАТОВА, БГТУ, А. П. ЛАСКОВНЕВ, ФТИ НАН Беларуси

УДК 621.74

АЛЮМИНИЙ–МЕДНО–ГРАФИТОВЫЙ СПЛАВ, ПОЛУЧЕННЫЙ ПРИ МИКРОЛЕГИРОВАНИИ ФУЛЛЕРЕНОМ C₆₀

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

В настоящей работе исследовалось структурообразование нанокompозита на основе алюминий-медного сплава и углеродных наночастиц (фуллереносодержащей сажи). Работа выполнялась в направлении поиска возможности микролегирования фуллереном графита в алюминий-медь-графитовом материале путем использования фуллереносодержащей сажи с целью повышения прочностных характеристик подшипников скольжения, не уступающих характеристикам изделий, изготовленных из наиболее стойких антифрикционных бронз.

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

Образцы Al-Cu-фуллереносодержащая сажа готовили по специальной литейно-деформационной технологии. Фуллереносодержащую сажу с содержанием фуллерена C₆₀ 1 и 10% добавляли из расчета введения фуллеренов 0,02–1,1% с использо-

ванием эффекта «фуллереновой гомеопатии» [1]. Медь вводили 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, которые (брикеты) нагревали до температуры 550 °С, выдерживали 30 мин (чтобы прореагировали Cu и Al) и прессовали выдавливанием на кривошипном прессе со скоростью осадки 500 мм/с на диаметр 14 мм. Всего было подготовлено семь образцов, два из которых с содержанием 1,07% фуллерена (образец 7) и 0,107% фуллерена (образец 4) были подробно исследованы.

Исследовали микроструктуру, определяли фазовый состав и текстурованность, по структурным составляющим измеряли микротвердость.

Исследованием были выявлены существенные различия в состоянии образцов 7 и 4.

Образец 7 (Al-5,37%Cu + сажа + 1,07% фуллерена):

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

- по границам зерен располагается эвтектика (рис. 1, б), в структурные составляющие эвтектики

Т а б л и ц а 1. Данные по изготовленным образцам Al-Cu-фуллереносодержащая сажа

| Номер 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 |

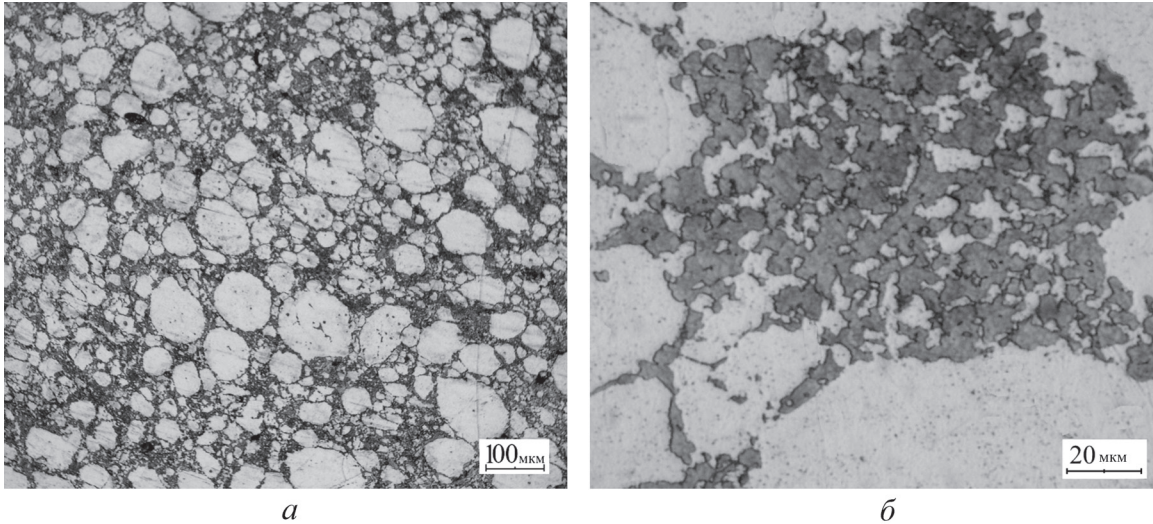


Рис. 1. Микроструктура образца 7 (продольное сечение): Al – 5,4% Cu + фуллереновая сажа – 9,7%, фуллерен – 1,07%

внедрились частицы сажи и фуллеренов, в структуре встречаются частицы меди;

- наличие эвтектики свидетельствует об оплавлении образца, что вполне объяснимо, так как 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;

- по результатам полуколичественного рентгенофазового анализа получен следующий фазовый состав образца 4:

| | | | |
|-------------------|-----------|-----|-------------------------|
| CuAl ₂ | [25-0012] | Tet | 10,4–10,4 (10,3–10,3)%, |
| AlCu | [26-0016] | Mon | 5,3–5,3 (5,3–5,3)%, |

| | | | |
|--------------------------------|-----------|-----|--------------------------------|
| Al ₂ O ₃ | [29-0063] | Cub | 0,9–0,9 (0,9–0,9)% – оксид Al, |
| C ₆₀ | [47-0787] | Hex | 2,4–2,4 (2,3–2,3)% – фуллерит, |
| CuAlO ₂ | [40-1037] | Hex | 0,8–0,8 (0,8–0,8)%, |
| Graphite | [25-0284] | Hex | 7,9–7,9 (7,8–7,8)%, |
| Cu | [04-0836] | GCK | 1,8–1,8 (1,8–1,8)%, |
| Al | [04-0787] | Cub | 66,1–66,1 (65,4–65,4)%. |

В отличие от образца 4 образец 7 не содержит карбида Al₄C₃ (рис. 2).

Образец 4 (Al-5,4%Cu + сажа + 0,107% фуллерена):

- 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;

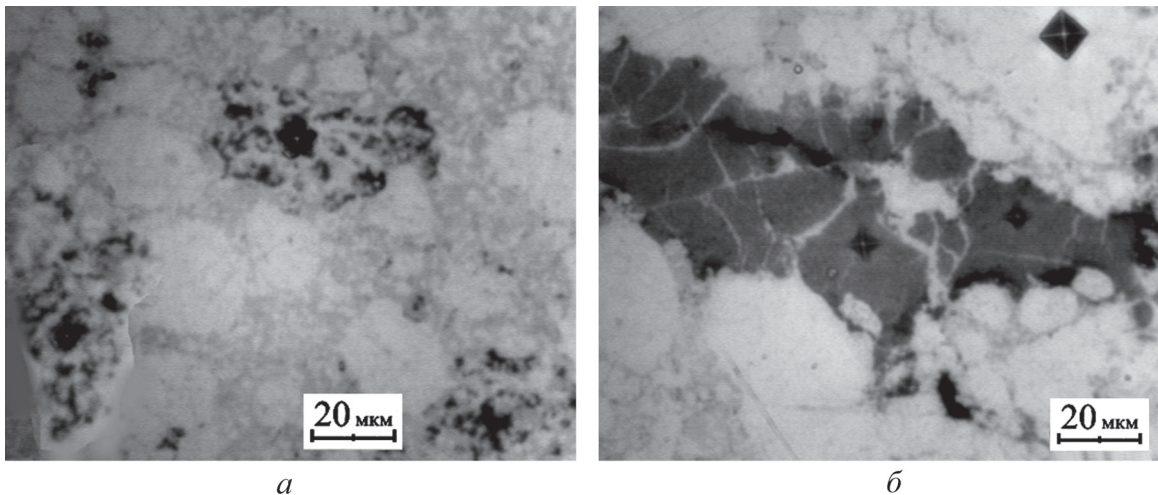


Рис. 2. Микроструктура образца 7 (продольное сечение) с отпечатками микротвердости: а – $H_m = 2680, 3560$ МПа в эвтектике с частицами черной фазы; б – $H_m = 1760, 2350$ МПа в частицах с дисперсной структурой фазы серого цвета, $H_m = 1004$ МПа основы

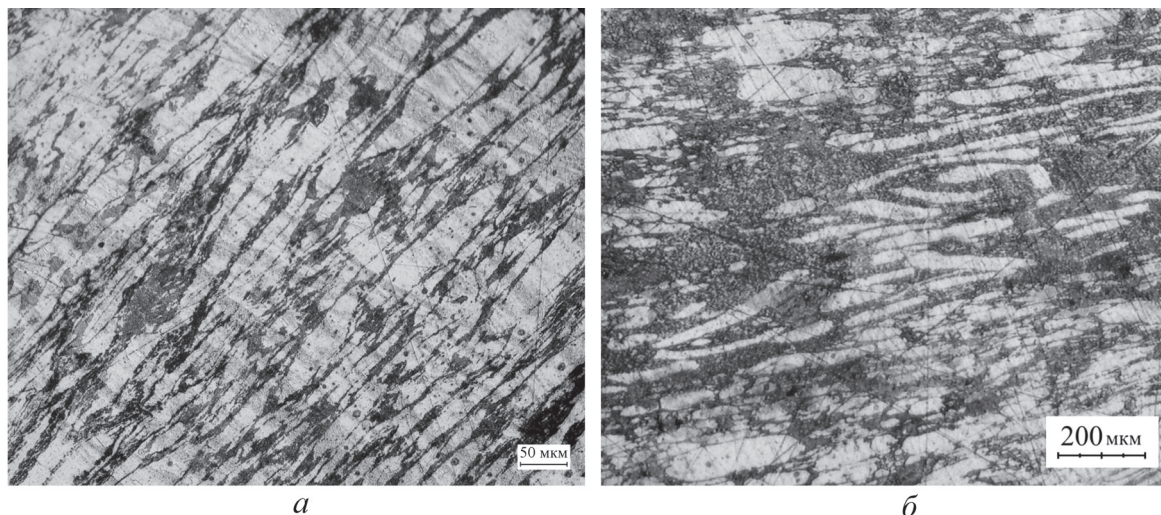


Рис. 3. Микроструктура образца 4 (продольное сечение): Al – 5,4% Cu + фуллереновая сажа – 10,6%, фуллерен – 0,107%

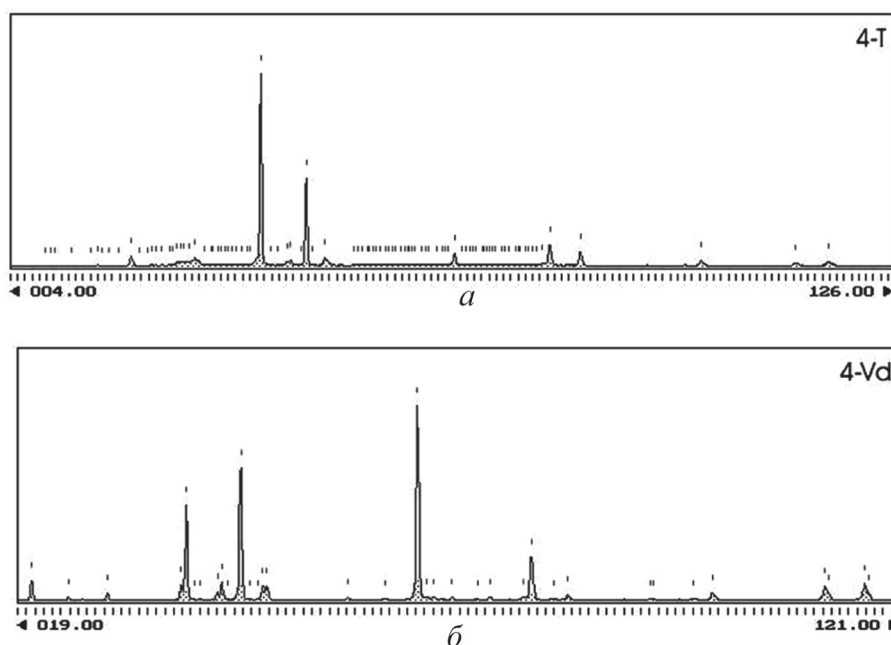


Рис. 4. Рентгенограммы образца 4: *a* – съемка поперечного сечения; *б* – съемка продольного сечения с явными признаками текстуры деформации

- 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 (определяли на поперечном образце без выявления текстуры):

| | | | | |
|--|-----------|-----|-----------|--------------|
| Al ₂ C ₆ O ₁₂ | [37-0488] | – | 6,5–6,5 | (5,6–5,6)% |
| Al ₂ O ₃ | [37-1462] | – | 2,8–2,8 | (2,7–2,7)% |
| Al ₂ OC | [36-0148] | Hex | 0,9–0,9 | (0,8–0,8)% |
| Al ₄ C ₃ | [01-0953] | Hex | 2,1–2,1 | (2,0–2,0)% |
| Al | [04-0787] | Cub | 74,8–74,8 | (73,8–73,8)% |
| Cu ₂ O | [05-0667] | Cub | 1,8–1,8 | (1,8–1,8)% |
| CuAl ₂ | [25-0012] | Tet | 1,4–1,4 | (1,4–1,4)% |

| | | | | |
|-----------------|------------|-----|---------|------------|
| Cu | [04-0836] | GCK | 0,4–0,4 | (0,4–0,4)% |
| C ₆₀ | [cF1924,1] | Cub | 1,0–1,0 | (1,0–1,0)% |
| Graphite | [25-0284] | Hex | 7,3–7,3 | (7,1–7,1)% |

В результате изготовления и исследования нанокомпозита на основе алюминий-медного сплава и углеродных наночастиц (фуллеренсодержащей сажи) установлено.

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

- в образце с содержанием 1,07% фуллеренов C₆₀ 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

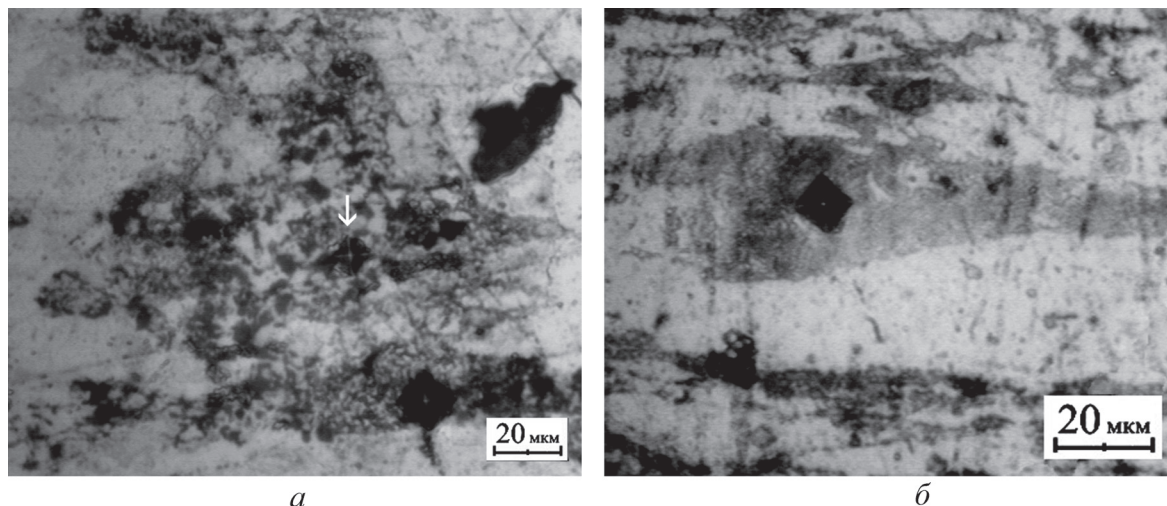


Рис. 5. Микроструктура образца 4 (продольное сечение) с отпечатками микротвердости: *a* – $H_m = 2460$ МПа, серые и черные частицы в светлой, тонкого строения фазе; *б* – $H_m = 2550$ МПа в широкой полосе фазы серого цвета с дисперсной структурой

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% произошло образование карбида алюминия Al_4C_3 , который выявлен в образце с малой добавкой фуллеренов.

Выводы

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 работы 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. Okatova G. P., Svidunovich N. A. 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 // Abstracts VII International Conference «Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides», Alushta. Crimea, Ukraine. 2001. P. 540–543.
2. Окатова Г. П., Свидуневич Н. А. Изменение кристаллической структуры и свойств полимерных материалов при микролегировании фуллереном C_{60} // Российский химический журнал. Раздел «Новые направления использования углеродных материалов». 2006. Т. L. № 1. С. 68–70.