

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. Т. Волочко**, доктор технических наук, профессор (ФТИ НАН Беларуси);  
**А. П. Ласковнев**, доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент, заместитель директора (ФТИ НАН Беларуси);  
**С. Н. Лежнев**, кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе  
(Карагандинский государственный индустриальный университет, Республика Казахстан)

### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЛИГАТУР Al–C

В работе приведены результаты исследования структурообразования лигатур Al–C, полученных с использованием фуллеренов C<sub>60</sub>, фуллереносодержащей сажи, фуллереновой черни и микрокристаллического углерода.

This work contains research results structure formation of alloys Al–C, the obtained with the fullerene C<sub>60</sub>, fullerenes soot, fullerenes black and micro-crystalline carbon.

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

Современные композиционные материалы обладают большей удельной прочностью, чем лучшие конструкционные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. Имеются серьезные основания утверждать, что физико-механические свойства конструкционных материалов, применяемых в настоящее время, не являются достаточными для ряда перспективных изделий. Таким образом, необходимы композиционные материалы с более высоким уровнем свойств, повышения которых можно достичь путем оптимизации существующих технологий и составов материалов, а также применения новейших технологий и материалов, в частности нанотехнологий и наноматериалов.

Наноструктурирование рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных путей повышения физико-механических свойств конструкционных и функциональных материалов. Известно, что свойства наноструктурных композиционных материалов (НКМ) в значительной степени определяются как свойствами самих наночастиц, так и особенностями их взаимодействия [1]. Одним из быстро развивающихся в настоящее время направлений является создание новых НКМ с металлической матрицей, упрочненных различными углеродными наноструктурами (УНС).

**Основная часть.** В результате проведения работ в направлении создания новых металлических материалов на основе алюминия и наноуглеродных материалов были получены опытные образцы лигатур Al–C.

Для получения таких лигатур использовалась литейно-деформационная технология, раз-

работанная в Физико-техническом институте НАН Беларуси, включающая смешивание порошковых компонентов шихты, проведение механоактивации полученной смеси, экструдирования шихты с получением лигатуры.

Образцы готовились из порошков алюминия с размером частиц основной фракции 5–100 мкм и ряда наноуглеродных материалов в соотношении Al – 10 мас. % C в исходной смеси.

В качестве углеродных материалов использовались:

- фуллереносодержащая сажа производства института им. Иоффе, Санкт-Петербург;
- фуллерены C<sub>60</sub> производства института им. Иоффе, Санкт-Петербург;
- фуллереновая чернь производства института им. Иоффе, Санкт-Петербург;
- углеродные микрочастицы размером 3, 4, 9 мкм, производства ASBURY GRAPHITE MILLS, INC., США.

В соответствии с задачей исследований по изысканию возможности замены при создании новых материалов дорогостоящего фуллерена на более дешевый фуллереносодержащий материал изготовление образцов с введением фуллеренов, как эталонных, производилось для сравнения.

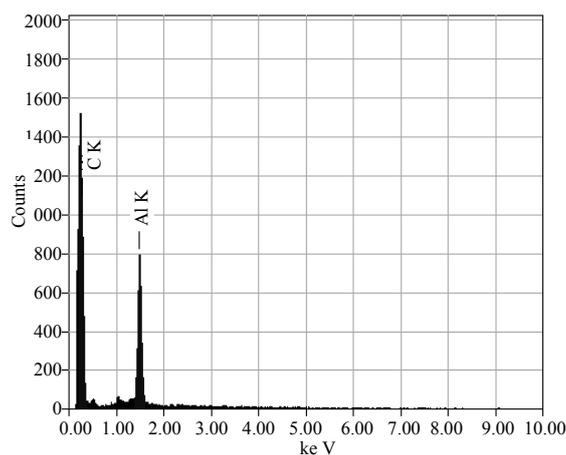
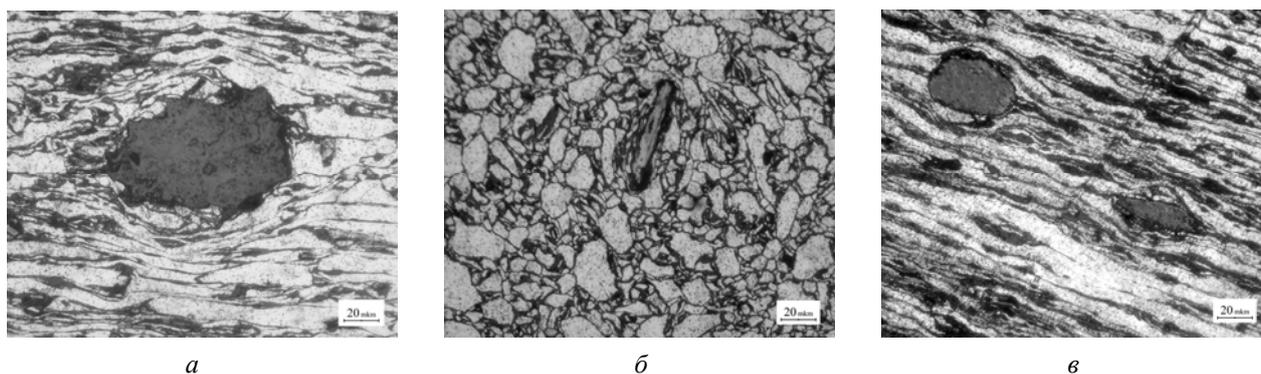
Методами рентгеноструктурного анализа, световой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии с системой качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа, метода измерения микротвердости исследованы элементный, фазовый состав, структурное состояние и показатели механических свойств исходных компонентов, шихты после ее механоактивации, лигатур Al–C после экструдирования шихты.

Результаты комплексных исследований порошка фуллереновой сажи ФТИ им. А.Ф. Иоффе, РАН показали, что порошок состоит из дисперсных частиц сажи и крупных частиц фуллеренов. При этом сажа в основе своей состоит из аморф-

ного углерода, содержит  $\approx 8\%$  фуллеренов и не содержит, кроме небольшого количества кислорода, никаких посторонних примесей. Фуллереновая чернь на 100% состоит из сажистого углерода, какие либо другие примеси не обнаружены. Порошок состоит из частиц небольшого размера от 3–5 мкм и очень больших частиц, но все это только конгломераты. По данным [2], фуллереновая чернь представляет собой черный мелкодисперсный порошок с размерами частиц 40–50 нм. Частицы микрокристаллического углерода имеют вид как пластинок, чешуек, типичных для гексагонального кристаллического строения, так и микрогранул сферической формы.

Исследования шихты после ее механоактивации показали, что в шихте системы Al–C при ее механоактивации протекают процессы пластического деформирования исходных порошковых компонентов и не наблюдается изменений элементного и фазового составов. При этом полученные топограммы порошков шихты с различными углеродными добавками схожи.

Результаты исследований композиций Al–C после экструдирования шихты показали, что в образцах выявлены необычные для Al–C сплавов сверхтвердые частицы серого цвета (рис. 1). При замерах микротвердости этой фазы обнаружен эффект восстановления отпечатка индентора, что указывает на ее весьма высокие упругие свойства. Микрорентгеноспектральным анализом EDX (рис. 1, г) установлено, что эта сверхтвердая фаза – углеродная. В микроструктуре ряда образцов (особенно в серии с фуллереновой чернью) наблюдались частицы серой фазы с волнистой, без следов шлифования-полирования поверхностью (рис. 1, а, 2), имеющие очень высокую микротвердость: отпечатки индентора на изображении практически не видны, отпечатки съезжают с частицы, оставляя кресты со сколом (рис. 2). Такое поведение этой фазы при измерении микротвердости свидетельствует об их высокой твердости, возможно, близкой по значению к твердости алмаза.



Element	(ke V)	mass %	Error %	At %
C K	0.277	85.64	0.89	93.05
Al K	1.486	14.36	0.49	6.95
Total		100.00		100.00

г

Рис. 1. Структура образцов лигатур Al–C:  
 а – Al + 10% фуллереновой черни,  $\times 500$ ; б – Al + 10% фуллеренов,  $\times 500$ ;  
 в – Al + 10% фуллереновой сажи,  $\times 500$ ; г – результаты микрорентгеноспектрального анализа EDX  
 серой фазы в лигатуре Al + 10% фуллереновой черни

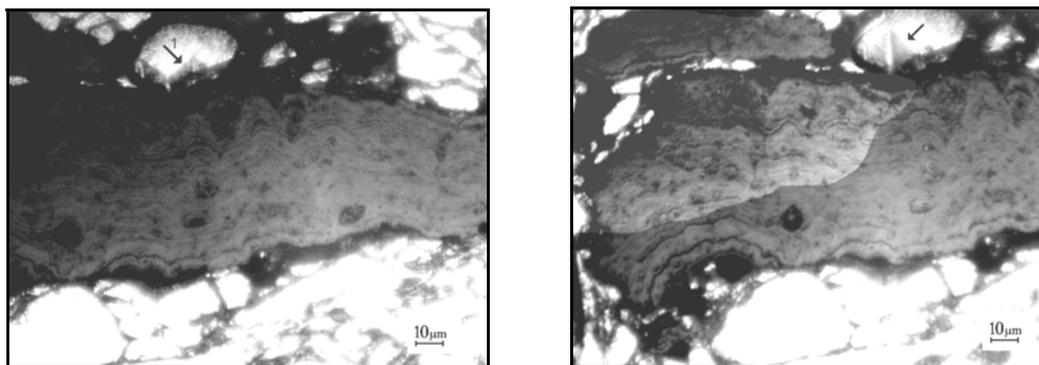


Рис. 2. Частица волнистой серой фазы с нанесенными отпечатками индентора (индентор съезжает с поверхности частицы по стрелкам)

Такую фазу содержат все изготовленные с нанокремнеземными добавками образцы – и с фуллереносодержащей сажей, и с фуллереновой чернью, и с фуллеренами  $C_{60}$  (рис. 1). Анализ показал, что размеры, форма и количество особо твердой чисто углеродной фазы с высокой упругостью различны в лигатурах разных составов.

Авторами настоящих исследований параллельно проводятся работы по разработке технологии получения новых материалов на нанокремнеземной основе с добавкой железа путем высокотемпературного ( $\approx 1000^\circ\text{C}$ ) преобразования высоким давлением (4–5 ГПа) [3]. В результате были получены образцы композитов (90% фуллереновой сажи + 10% мас. Fe) с тремя основными типами серой фазы: волнистой, гладкой темно-серой фазой с огранкой и серой фазой «основа» (рис. 3).

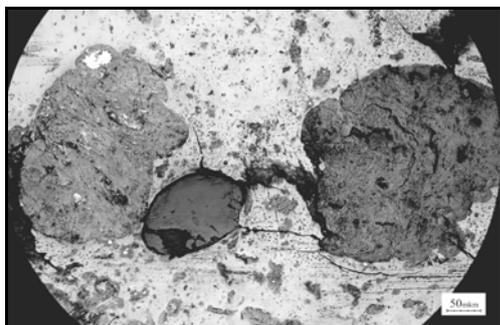


Рис. 3. Морфология частиц и «основы» серой фазы в образце – 90% мас. фуллереновой сажи + 10% Fe

Исследования показали, что структура и поведение серых фаз при измерении микротвердости в системах Al–C и C–Fe схожи. Однако вышеописанные структурные состояния в случае систем Al–C и C–Fe были получены в существенно отличающихся условиях, что предполагает проведение дальнейших исследований.

Анализ результатов исследования структурного состояния образцов композиций алюминий – микрокристаллический углерод после экструдирования шихты показал равномерное

распределение углеродной составляющей (черных и серых включений) в алюминиевой матрице. При этом малые размеры углеродных включений не позволяют произвести замеры их микротвердости, что не дает возможности идентифицировать их как сверхтвердые углеродные фазы, которые были получены в случае использования нанокремнеземных добавок.

**Заключение.** Таким образом, поэтапно изучено структурное состояние лигатур Al–C при их получении. При этом исследования не выявили принципиальных отличий в структурообразовании лигатур Al–C, полученных с использованием дорогостоящих фуллеренов, в сравнении с лигатурами, полученными с использованием более дешевых нанокремнеземных материалов, что делает их перспективными для промышленного освоения. Такие лигатуры могут быть использованы в качестве добавок, содержащих ультрадисперсное углеродосодержащее сырье различных модификаций, при создании новых антифрикционных композиционных материалов системы Al–C для объектов новой техники, отличающихся высокими техническими характеристиками, в частности для прецизионных деталей машиностроения, изделий, работающих на трение при повышенных нагрузочно-скоростных условиях.

### Литература

1. Гусев, И. А. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / И. А. Гусев. – Екатеринбург: УПО РАН, 1998. – 198 с.
2. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.
3. Влияние условий термобарической обработки нанокремнезема под высоким давлением на образование и тонкую структуру сверхтвердой фазы / В. С. Урбанович [и др.] // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология: тез. докл. Восьмой Междунар. конф., Троицк, 25–28 сент. 2012 г. / ФГУ ТИСНУМ. – Троицк: Тривант, 2012. – С. 500–510.

Поступила 21.02.2013