

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЛИГАТУР Al-C

Д.В. Куис<sup>1</sup>, А.Т. Волочко<sup>2</sup>, Н.А. Свидунович<sup>1</sup>,  
Г.П. Окатова<sup>1</sup>, С.Н. Лежнев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Беларусь; [dmitrykuis@mail.ru](mailto:dmitrykuis@mail.ru)

<sup>2</sup> Физико-технический институт НАН Беларуси,  
г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Карагандинский государственный индустриальный  
университет, г. Темиртау, Казахстан

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

Благодаря комплексу свойств (низкой стоимости, низкому весу, высокой удельной прочности в сочетании с пластичностью, коррозионной стойкостью и др.) алюминиевые сплавы выгодно отличаются от других металлических конструкционных материалов, что определяет перспективность их использования во многих отраслях промышленности при создании новых устройств и механизмов, а также расширении областей использования при замене сталей и дорогостоящих титановых сплавов с целью уменьшения веса и стоимости конструкций. Однако при повышенных нагрузочно-температурных условиях эти материалы не отвечают требованиям эксплуатации. Таким образом, необходимы композиционные материалы с более высоким уровнем свойств, повышение которых можно достичь путем оптимизации существующих технологий и составов материалов, а также применив новейшие технологии и материалы. В свою очередь

наноструктурирование рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных путей повышения комплекса физико-механических свойств конструкционных и функциональных материалов. Одним из наиболее быстро развивающихся в настоящее время направлений является разработка новых наноструктурных металломатричных композиционных материалов с использованием нанокремниевых добавок [1].

В результате проведения работ в направлении создания новых металлических материалов на основе алюминия и нанокремниевых материалов были получены опытные образцы лигатур Al-C и Al-Si-C.

Для получения таких лигатур использовалась литейно-деформационная технология, разработанная в Физико-техническом институте НАН Беларуси, включающая смешивание порошковых компонентов шихты, проведение механоактивации полученной смеси, экструдирования шихты с получением лигатуры.

Образцы лигатур готовились из порошков алюминия с размером частиц основной фракции 5–100 мкм или измельченной стружки сплава АК9 и ряда нанокремниевых материалов в соотношении Al – 10 мас. % C в исходной смеси.

В качестве кремниевых материалов использовались: фуллереносодержащая сажа, фуллерены C<sub>60</sub>, фуллереновая чернь производства института им. Иоффе, Санкт-Петербург; кремниевые 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 и Al-Si-C после экструдирования шихты.

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 после экструдирования шихты показали, что в образцах выявлены необычные для Al-C и Al-Si-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.

Такую фазу содержат все изготовленные с нанougлеродными добавками образцы – и с фуллеренсодержащей сажей, и с фуллереновой чернью, и с фуллеренами C<sub>60</sub> (рис. 1). Анализ показал, что размеры, форма и количество особо твердой углеродной фазы с высокой упругостью различны в лигатурах разных составов.

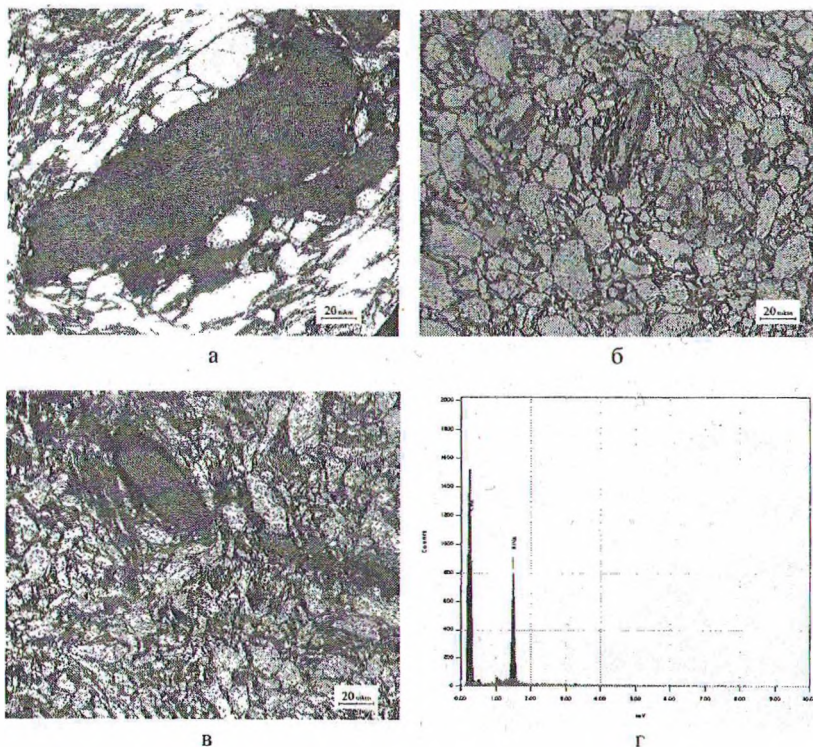


Рис. 1. Структура образцов лигатур Al-C: *а* – Al + 10% фуллереновой черни,  $\times 500$ ; *б* – Al + 10% фуллеренов,  $\times 500$ ; *в* – Al + 10% фуллереновой сажи,  $\times 500$ ; *г* – результаты микрорентгеноспектрального анализа EDX серой фазы в лигатуре Al + 10% фуллереновой черни

Авторами настоящих исследований параллельно проводятся работы по разработке технологии получения новых материалов на нанокуглеродной основе с добавкой железа путем высокотемпературного ( $\approx 1000$  °C) преобразования высоким давлением (4–5 ГПа) [2]. 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).

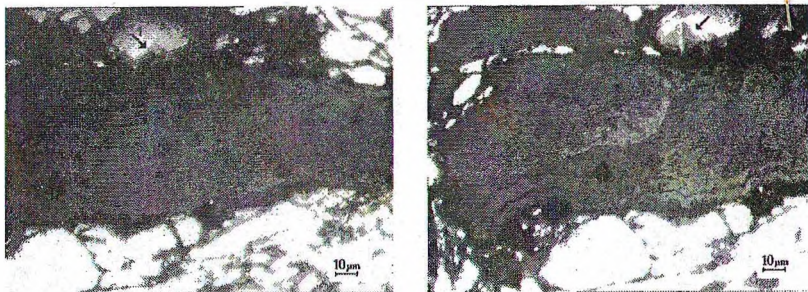


Рис. 2. Частица волнистой серой фазы с нанесенными отпечатками индентора (индентор съезжает с поверхности частицы по стрелкам)

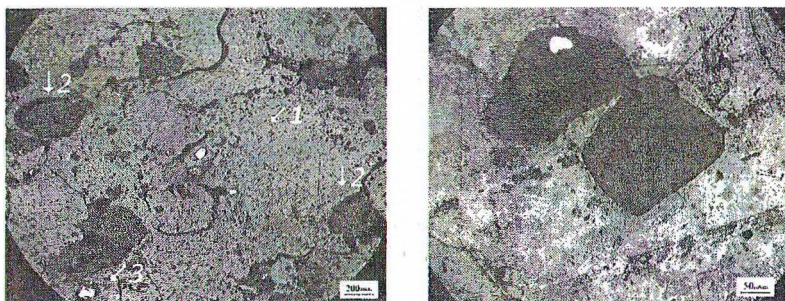


Рис. 3. Микроструктура образца из шихты на основе экстрагированной фуллереновой сажи,  $P = 4$  ГПа,  $T_{\text{сп}} = 1200$  °С, время спекания – 43 с (по стрелке  $\surd 1$  – связующая серая «фаза-основа»; по стрелке  $\surd 2$  – включения супертвердых частиц рельефа «зигзаг» и «крупчатый», по стрелке  $\surd 3$  – частицы на основе Fe; по стрелке  $\surd 4$  – «гладкая темно-серая фаза» с огранкой или округлая)

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

Анализ результатов исследования структурного состояния образцов композиций Al–микрористаллический 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 наноуглеродных добавок.

Таким образом, поэтапно изучено структурное состояние лигатур Al-C и Al-Si-C при их получении. При этом исследования не выявили принципиальных отличий в структурообразовании лигатур, полученных с использованием дорогостоящих фуллеренов, в сравнении с лигатурами, полученными с использованием более дешевых наноуглеродных 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. Влияние условий термобарической обработки наноуглерода 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: Тровант, 2012. С. 500–510.

## FEATURES OF STRUCTURE CONDITIONS OF Al-C ALLOW

<sup>1</sup>Kuis D.V., <sup>2</sup>Volochko A.T., <sup>1</sup>Svidunovich N.A.,

<sup>1</sup>Okatova G.P., <sup>3</sup>Legnev S.N.

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of  
Belarus, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

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.