

Д. В. Куис, доц., канд. техн. наук;
Н. А. Свидуневич, проф., д-р техн. наук;
Г. П. Окатова, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
А. Т. Волочко, проф., д-р. техн. наук;
А. П. Ласковнев, чл.-корр. НАН Беларуси, проф., д-р. техн. наук
(ГНУ «ФТИ НАН Беларуси», г. Минск);
О. Ю. Пискунова, инж.; П. В. Рудак, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЛИГАТУР Al-C

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, повышение которых можно достичь путем оптимизации существующих технологий и составов материалов, а также применив новейшие технологии и материалы, в частности нанотехнологии и наноматериалы.

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

Для получения таких лигатур использовалась литейно-деформационная технология, разработанная в ГНУ «Физико-технический институт 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 нанокремниевых материалов в соотношении Al – 10 масс. % C в исходной смеси.

В качестве углеродных материалов использовали:

- фуллереносодержащая сажа, производства института им. Иоффе, Санкт-Петербург;
- фуллерены C₆₀, производства института им. Иоффе, Санкт-Петербург;
- фуллереновая чернь, института им. Иоффе, Санкт-Петербург;
- углеродные микрочастицы размером 3, 4, 9 мкм, производства ASBURYGRAPHITEMILLS, INC., США.

В соответствии с задачей исследований по изысканию возмож-

ности замены при создании новых материалов дорогостоящего фуллере́на на более дешёвый фуллеренсодержащий материал изготовление образцов с введением фуллеренов, как эталонных, производилось для сравнения.

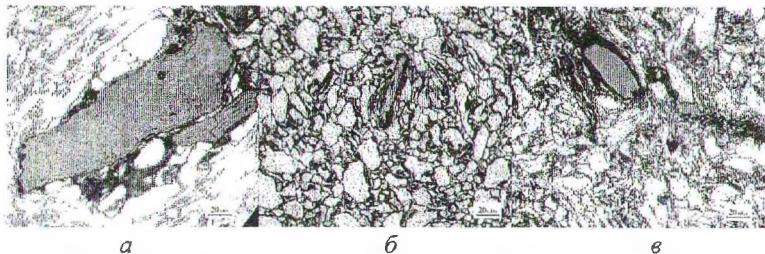
Методами рентгеноструктурного анализа, световой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии с системой качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа, метода измерения микротвёрдости исследованы элементный, фазовый состав, структурное состояние и показатели механических свойств исходных компонентов, шихты после её 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 аморфного 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 [1] фуллереновая чернь представляет собой чёрный мелкодисперсный порошок с размерами частиц 40–50 нм. Частицы микрокристаллического углерода имеют как вид пластинок, чешуек, типичных для гексагонального кристаллического строения, так и микрогранул сферической формы.

Исследования шихты после её механоактивации показали, что в шихте системы Al-C при её 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 сверхтвёрдые частицы серого цвета (рисунок 1). При замерах микротвёрдости этой фазы обнаружен эффект восстановления отпечатка индентора, что указывает на её весьма высокие упругие свойства. Микрорентгеноспектральным анализом EDX установлено, что эта сверхтвёрдая фаза – углеродная. В микроструктуре ряда образцов (особенно в серии с фуллереновой чернью) наблюдались частицы серой фазы с волнистой, без следов шлифования-полирования поверхностью (рисунок 1, а, 2), имеющие очень высокую микротвёрдость:

отпечатки индентора на изображении практически не видны, отпечатки съезжают с частицы, оставляя кресты со сколом (рисунок 2). Такое поведение этой фазы при измерении микротвердости свидетельствует об их высокой твердости, возможно близкой по значению к твердости алмаза.



a – Al + 10% фуллереновой черни, $\times 500$; *b* – Al + 10% фуллеренов, $\times 500$; *в* – Al + 10% фуллереновой сажи, $\times 500$

Рисунок 1 – Микроструктура образцов лигатур Al-C

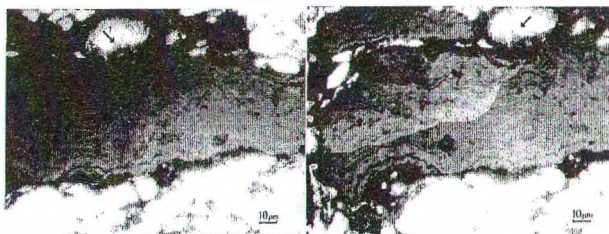


Рисунок 2 – Частица волнистой серой фазы с нанесенными отпечатками индентора (индентор съезжает с поверхности частицы по стрелкам)

Таковую фазу содержат все изготовленные с нанокуглеродными добавками образцы – и с фуллеренсодержащей сажей, и с фуллереновой чернью, и с фуллеренами C_{60} (рисунок 1). Анализ показал, что размеры, форма и количество особотвердой чисто углеродной фазы с высокой упругостью различны в лигатурах разных составов.

Авторами настоящих исследований параллельно проводятся работы по разработке технологии получения новых материалов на нанокуглеродной основе с добавкой железа путем высокотемпературного ($\approx 1000^\circ\text{C}$) 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» (рисунок 4).

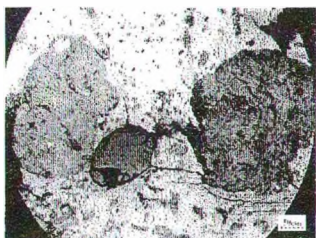


Рисунок 4 – Морфология частиц и «основы» серой фазы в образце – 90% мас. фуллереновой сажи + 10% Fe

Исследования показали, что структура и поведение серых фаз при измерении микротвердости в случае системы 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 Al-микроструктурированный 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 нанокристаллического углерода.

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 нанокристаллических углеродных 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 с повышенными свойствами, что позволит рекомендовать их взамен деталей узлов трения из бронзы, а также алюминий-графитовых изделий, поставляемых в большинстве своем по импорту.

ЛИТЕРАТУРА

1 Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.

2 Урбанович, В. С. Влияние условий термобарической обработки нанокристаллического углерода под высоким давлением на образование и тонкую структуру сверхтвердой фазы / В. С. Урбанович [и др.] // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология: тезисы докладов Восьмой Междунар. конф., Троицк, 25–28 сент. 2012 г. / ФГУ ТИСНУМ. – Троицк: Изд-во «Тривант», 2012. – С. 500-510.