

УДК 669.715.046.516.4-022.532

**Д. В. Куис**, доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой (БГТУ);  
**Н. А. Свидунович**, профессор, доктор технических наук (БГТУ);  
**А. Т. Волочко**, заведующий отделом (ФТИ НАН Беларуси);  
**А. А. Шегидевич**, научный сотрудник (ФТИ НАН Беларуси);  
**С. Н. Лежнев**, проректор по учебной работе (КГИУ, Республика Казахстан);  
**А. В. Омелюсик**, магистрант (БГТУ)

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Проведено исследование по процессам структурообразования и механическим характеристикам лигатур Al-C и Al-Si-C. Полученные результаты дают основание утверждать, что данный тип лигатур является перспективным в качестве добавок, обеспечивающих модифицирование и дисперсное упрочнение при создании композиционных материалов на основе алюминия, что благоприятно влияет на их эксплуатационные свойства.

The investigation has been made of structure formation processes and mechanisms characteristic of Al-C and Al-Si-C master alloys. The results obtained give grounds for stating that this type of master alloys has potential for use as additives that ensure modification and precipitation hardening of aluminum-based composite materials under development which affects favorably their performance properties.

**Введение.** Современные тенденции развития машиностроения устанавливают новые требования к материалам и технологиям производства деталей. Основное внимание уделяется снижению массы и стоимости готовых изделий при одновременном достижении более высокого уровня их свойств. Однако свойства деталей, в большей степени, зависят от характеристик применяемых материалов, производственных процессов, а также технологии изготовления.

Несмотря на комплексность подхода к выбору материала для таких деталей, как шатун, втулка скольжения, поршень, одним из главных критериев применимости материала являются низкие стоимость изделий и их вес, высокая удельная прочность в сочетании с пластичностью, коррозионная стойкость. В этой связи композиционные материалы на основе алюминия выгодно отличаются от других металлических конструкционных материалов, что определяет перспективность их использования во многих отраслях промышленности при создании новых устройств и механизмов, а также расширение областей использования при замене дорогостоящих материалов на основе железа, титана, меди.

**Основная часть.** Для получения опытных образцов наномодифицированного композиционного материала на основе алюминия использовалась литейно-деформационная технология, разработанная в ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» [1], включающая смешивание порошковых компонентов шихты и проведение механоактивации полученной смеси, экструдирование шихты с получением лигатуры и получение композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы при литье.

Образцы лигатур готовились из порошков алюминия с размером частиц основной фракции

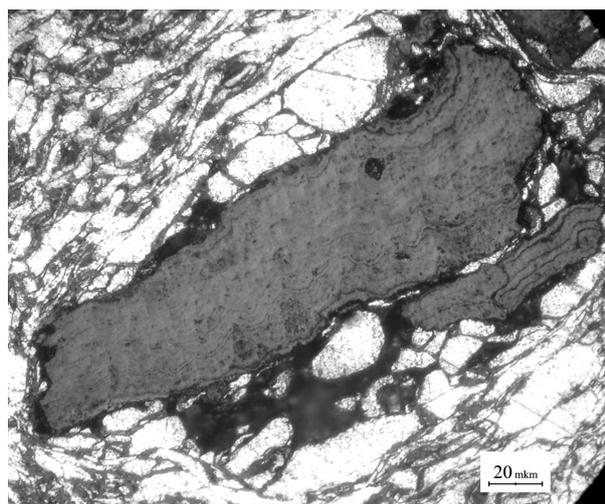
5–100 мкм или измельченной стружки сплава АК9ч и ряда наноуглеродных материалов (фуллереновая сажа, фуллерены C<sub>60</sub>, фуллереновая чернь) в соотношении Al – 10 мас. % C в исходной смеси.

Результаты исследований композиций Al-C и Al-Si-C после экструдирования шихты показали, что в образцах выявлены необычные для алюминиевых сплавов сверхтвердые частицы серого цвета (рис. 1). Микрорентгеноспектральным анализом EDX установлено, что сверхтвердые частицы серого цвета представляют собой углеродную фазу.

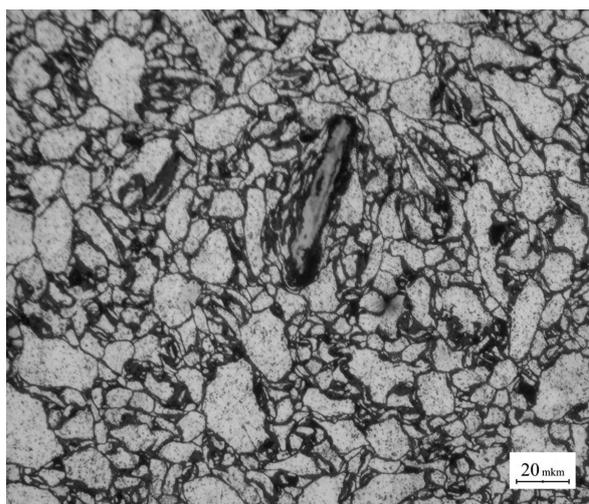
Таковую фазу содержат все изготовленные с наноуглеродными добавками лигатуры – и с фуллереновой сажой, и с фуллереновой чернью, и с фуллеренами C<sub>60</sub>. Анализ показал, что размеры, форма и количество особо твердой чисто углеродной фазы с высокой упругостью различны в лигатурах разных составов. При этом исследования не выявили принципиальных отличий в структурообразовании лигатур Al-C и Al-Si-C, полученных с использованием дорогостоящих фуллеренов, в сравнении с лигатурами, полученными с использованием более дешевых наноуглеродных материалов, что делает их перспективными для промышленного освоения.

С помощью спектроскопии комбинационного рассеивания света нами установлено, что полученные сверхтвердые частицы серого цвета являются аморфным материалом, подобным стекловидному углероду (рис. 2). Его твердость является изотропной, то есть одинаково высокой во всех направлениях.

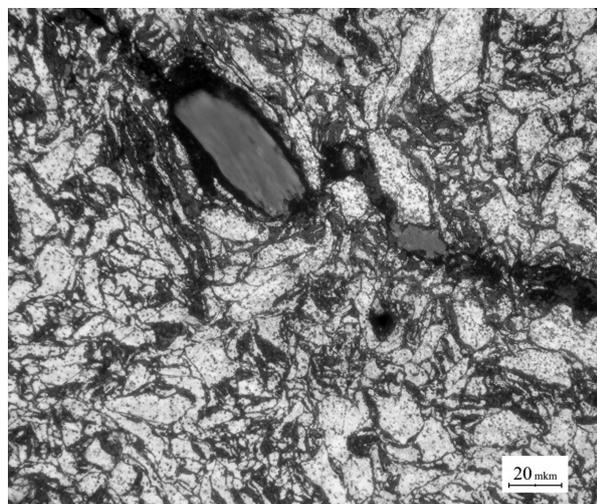
При исследовании фазового состава определено, что в полученных с использованием наноуглеродных материалов (фуллереносодержащей сажи и черни) лигатурах идентифицируется незначительное количество карбидной составляющей (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и (или) SiC).



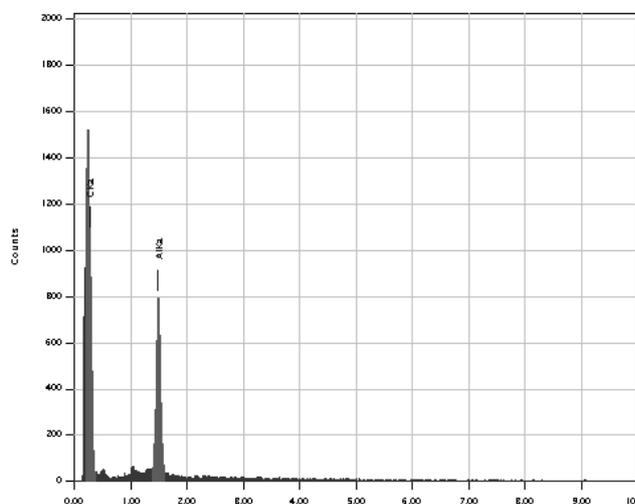
а



б



в



Element	(keV)	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 – результаты микрорентгеноспектрального анализа EDX серой фазы в лигатуре Al + 10% фуллереновой черни

Таким образом, определено структурное превращение углерода с образованием в лигатурах новой аморфной фазы (стеклоуглерод) наряду с карбидообразованием. Такое структурное состояние полученных лигатур определяет перспективность их использования в качестве добавок, обеспечивающих не только дисперсное упрочнение, но и модифицирование сплава при создании композитов, отличающихся высоким комплексом свойств.

Микроструктура алюминиевого сплава после обработки свидетельствует о равномерном модифицировании всех составляющих сплава, в том числе и эвтектической состав-

ляющей (рис. 3). Установлено, что кристаллы эвтектического кремния измельчились в 4 раза, а ширина дендритов алюминиевой  $\alpha$ -фазы уменьшилась в 3–3,5 раза. В сравнении с исходным силумином прочность литого композита при повышенных температурах увеличилась в 2 раза и составила почти 450 МПа, возросла твердость почти в 1,5 раза до 110 НВ, увеличилась износостойкость в 2 раза, при этом пластические характеристики свидетельствуют о возможности дальнейшей пластической деформации литых заготовок ( $\delta = 8\text{--}10\%$ ). Наличие углеродных включений в микроструктуре способствовали уменьшению коэффициента

трения в 1,9 раза с 0,52 до 0,28 после часа испытаний.

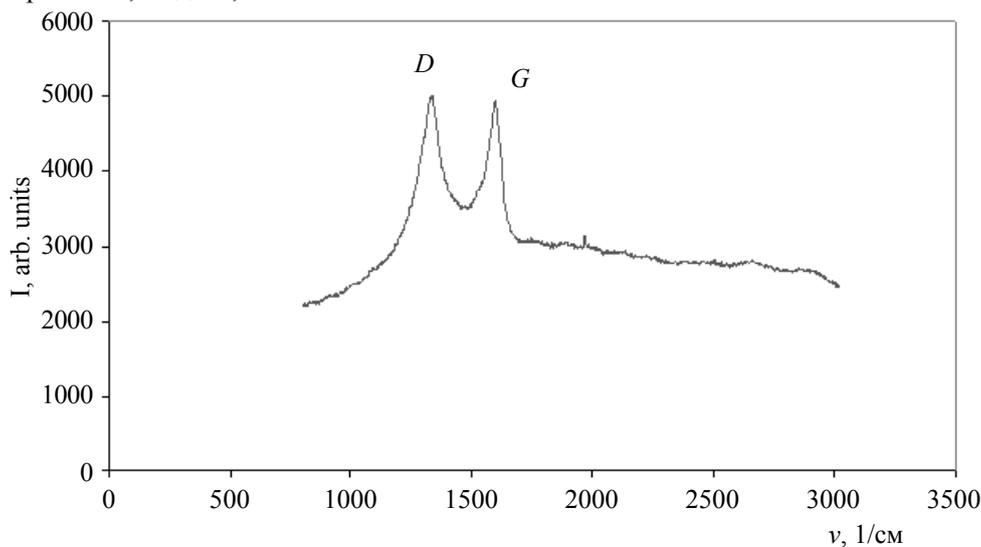


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света образца Al – 10% С

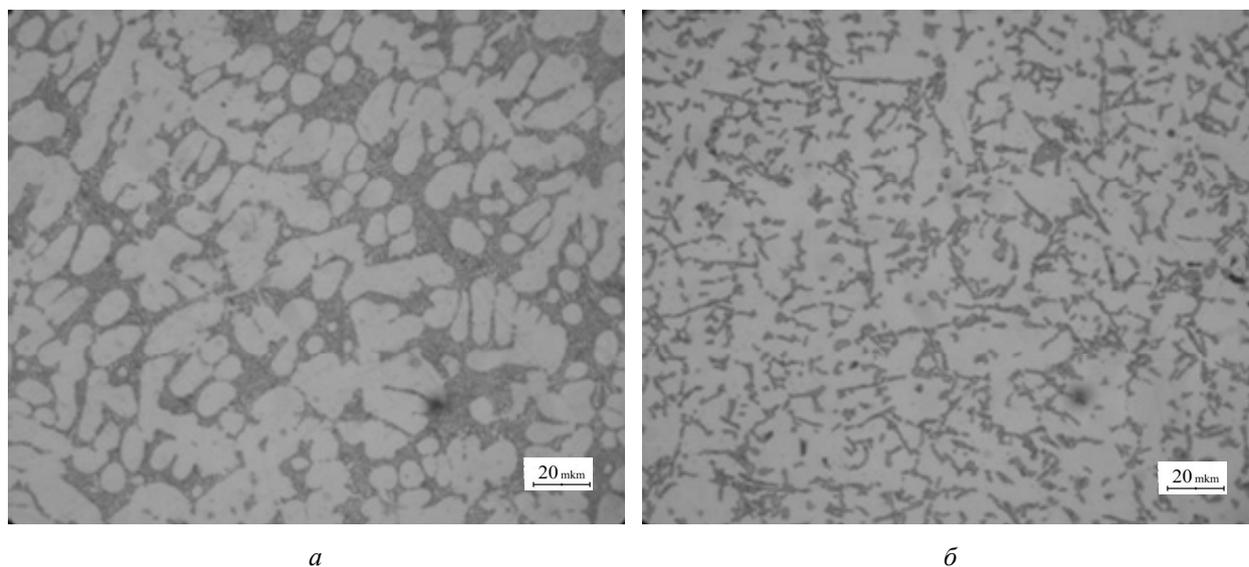


Рис. 3. Микроструктура сплава:  
а – исходного силумина АК9ч; б – литого композита с использованием лигатуры

**Заключение.** Таким образом, поэтапно изучены структурное состояние и свойства литых алюминиевых композитов, полученных с применением ультрадисперсного углеродсодержащего сырья. Такие материалы могут найти широкое применение при создании объектов новой техники, отличающихся высокими техническими характеристиками, в частности для прецизионных деталей машиностроения, изделий, работающих на тре-

ние при повышенных нагрузочно-скоростных условиях.

### Литература

1. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов. Минск: Беларус. навука, 2006. 302 с.

Поступила 27.02.2014