

# **МОДИФИЦИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**И. А. Евдокимов, Е. С. Прусов, А. В. Киреев**

Владимирский государственный университет  
ООО "Научно-производственное предприятие «НАНОтех»"  
г. Владимир

**Целью данного исследования** является создание принципиально новых материалов конструкционного назначения на основе алюминия и его сплавов с уникальными физико-механическими свойствами.

С развитием науки и техники требования, предъявляемые к конструкционным материалам, все более ужесточаются. Улучшение эксплуатационных характеристик приводит к расширению областей применения инновационных материалов и/или созданию для них конкурентных преимуществ по сравнению с материалами, существующими на рынке. В настоящей работе предлагается использовать подходы, основанные на принципах нанотехнологий, к получению композиционных материалов на металлической основе с улучшенными физико-механическими свойствами.

Создание и исследование композиционных материалов конструкционного и функционального назначения одно из ключевых направлений в современном материаловедении и в физике конденсированного состояния. Актуальность данного направления обусловлена широкими областями их применения в машиностроении, приборостроении, энергетике, авиационной и космической отраслях, обрабатывающей и добывающей промышленности, на транспорте, в медицине, производстве спортивного инвентаря и прочих областях.

Для реализации поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Проведение научных исследований и достижение результатов мирового уровня в следующих направлениях:

а) анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации и других материалов в области создания композиционных материалов на металлической основе с улучшенным или новым комплексом

свойств, способами, основанными на принципах нанотехнологий;

б) проведение патентных исследований согласно ГОСТ Р 15.011-96 по выбранному направлению;

в) разработка подходов к созданию композиционных материалов с применением углеродных наноматериалов;

г) экспериментальная оценка эффективности применения углеродных наноматериалов в сравнении с традиционными ингредиентами металломатричных композитов;

д) исследование воздействия внешних факторов на свойства композиционных материалов, содержащих углеродные наноматериалы.

2. Расширение сырьевой базы металлургической промышленности.

3. Повышение уровня, расширение спектра научных исследований, что приводит к росту следующих показателей эффективности данного проекта:

а) повышению качественных и количественных показателей по публикациям в ведущих международных и российских журналах и индексов международной цитируемости;

б) росту количества монографий, учебных пособий и учебников, изданных в ведущих российских и зарубежных издательствах;

в) росту количества внедрений инновационной продукции, технологий, подходов и повышению эффективности производств, в рамках отечественных предприятий металлургической отрасли;

г) повышению уровня и росту количества объектов интеллектуальной собственности, генерируемых научным коллективом.

Таким образом, выполнение данной работы должно обеспечивать достижение научных результатов мирового уровня.

В рамках предлагаемого проекта предполагаются детальные исследования модифицирования алюминиевых сплавов нано-

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

углеродными структурами для оптимизации концентраций легирующих компонентов и термодинамических условий образования композитов, а также исследования физических процессов, связанных с наноразмерными эффектами. В рамках данной работы предполагается применить (адаптировать) разработанные математические модели для композитов на основе эластомерных матриц к металлическим композитам с целью целенаправленного создания металл-наноразмерный наполнитель композита с заданными механическими свойствами.

В настоящее время в качестве приоритетных требований, предъявляемых к современным конструкционным материалам того или иного назначения является повышение прочностных характеристик и износостойкости, повышение или снижение тепло и электропроводности, наличие уникальных свойств необходимых в той или иной области применения, улучшение экологической обстановки при производстве и эксплуатации материалов. Как показывает практика, раздельное решение этих вопросов не дает пока положительных результатов: улучшение одного, двух параметров приводит к ухудшению других.

На настоящий момент задача одновременного улучшения указанных характеристик современных конструкционных материалов пока является трудноразрешимой. Согласно литературным данным большинство как внедренных, так и перспективных разработок в разрешении "магического треугольника" рабочих характеристик конструкционных материалов связано с созданием новых или модификацией серийных марок металл-матричных композиционных материалов. Поэтому большой интерес представляет возможность использования в качестве наполнителей углеродных наноматериалов.

Условия эксплуатации военной и космической техники требуют использования современных материалов, обладающих набором уникальных свойств таких, как высокая прочность, малый вес, высокие тепло и электротранспортные свойства. Для создания таких материалов весьма эффективны металл-матричные композиционные материалы, в том числе, на основе алюминия. Отличительными свойствами этих композиционных материалов являются высокие прочностные показатели и твердость, сочетающиеся с относительно высокой эластичностью, хорошей стойкостью к истиранию, высокими транспортными свойствами. Благодаря высокой

эластичности они способны хорошо воспринимать динамические деформации. Однако основным недостатком композиций как на основе серийно выпускаемых, так и экспериментальных металл-матричных композитов является ограниченный интервал рабочих температур, который, к сожалению, не охватывает диапазон температур эксплуатации машиностроительной и авиа-космической отрасли. Применяя подходы к модификации металлической матрицы с использованием наноструктурированных добавок, потенциально возможно регулировать температуростойкость композиционных материалов в довольно широком диапазоне.

Существует немало подходов к улучшению комплекса свойств композиционных материалов: оптимизация состава композиционного материала, технологии переработки, химическая модификация и др. В настоящее время возможности современных технологий позволяют получать материалы со структурной, упорядоченной на наноуровне, за счет структурных элементов, имеющих размеры порядка нескольких нанометров, что позволяет использовать для общего названия данных материалов понятие «наноматериалы». Использование наноматериалов в металл-матричных композиционных материалах теоретически обосновано, поскольку, обладая высоким энергетическим потенциалом и огромной удельной поверхностью, они способны изменять уровень взаимодействия на межфазной границе металл-наполнитель, что дает весьма эффективный инструмент по регулированию комплекса свойств металл-матричных композиционных материалов. Основным препятствием использования наноматериалов, как компонентов композитов, является самопроизвольное стремление наноструктур агрегироваться, выходя за границы наноразмерности, уже на этапе синтеза.

Это лишает подобные добавки их основных преимуществ перед традиционными и требует поиска эффективных путей предотвращения агрегации и агломерации наноматериалов, а также необходимости крайне сложного диспергирования их в металл-матричных композиционных материалах.

В данной работе предлагаются для использования в качестве компонентов наполнительных систем металл-матричных композиционных материалов углеродные наноматериалы (УНМ), мощности, для производства которых, и опыт по выпуску имеются в – ГОУ ВПО «ВлГУ», на установке каталитического синтеза углеродных наноматериалов. УНМ в

явном виде обладают тем же недостатком, о котором говорилось выше – склонностью к самопроизвольной агрегации с потерей наноразмерной упорядоченности. В то же время, УНМ остается весьма и весьма перспективным материалом для применения в составе композиционных материалов в случае эффективного его диспергирования в металлической матрице.

Для лучшего распределения наноматериалов в металлической матрице потенциально эффективным может оказаться использование принципа их функционализации, т.е. регулирования поверхностных свойств путем прививки функциональных групп. Принципиально функционализацией углеродных наноструктур физическими и химическими методами можно решить несколько задач. Прежде всего, функционализация должна быть направлена на формирование удовлетворительного уровня технологических свойств наноматериала, а именно на его растворимости в жидких средах, возможности совмещения с компонентами композиционного материала традиционными способами. Также такой процесс может служить эффективным путем введения тех или иных групп атомов с целью придания наночастицам новых функций, характерных для многих традиционных ингредиентов композиционных материалов. Вместе с тем процедура функционализации наноструктур должна обеспечивать сохранение или улучшение свойств, заложенных в наночастицах, главным из которых является способность модифицировать границу раздела фаз.

На данный момент в периодической печати практически не описаны возможные способы получения качественных металлматричных композиционных материалов модифицированных углеродными наноструктурами. По-видимому, из соображений конкуренции многие компании выполняют свои исследования без публикации результатов. Таким образом, использование нанодобавок в составе композиционных материалов требует решения целого спектра как теоретических, так и технологических задач связанных с описанием механизма упрочнения, изучением стабильности компонентов при тех или иных нагрузках, методах консолидации изделий, изучение других свойств композитов которые они приобретают после модификации углеродными наноструктурами.

В настоящее время в мире в направлении разработки подходов к регулированию характеристик композиционных материалов с

помощью введения наноматериалов работают несколько групп исследователей в ведущих мировых университетах (Rensselaer Polytechnic University, Stanford University, University of Sheffield, University of Troyes, Martin-Luther-Universities Halle – Wittenburg, Toyama Prefectural University и др.). Все группы исследователей сходятся во мнении, что введение в матрицу фазы наночастиц и, в первую очередь, на основе углеродных наноматериалов, позволяет получить широкие возможности по регулированию характеристик композиционных материалов.

В настоящее время накоплен значительный опыт в области создания и исследования металлуглеродных композиционных материалов. Наиболее распространенным способом создания композитов на основе наноразмерных добавок является порошковая металлургия. В большинстве выполненных исследований установлено повышение прочностных свойств на 30-40%. Изучено влияние однородности распределения углеродных наноструктур в объеме компактированных заготовок [3]. В числе других способов создание объемных нанокомпозитов с применением углеродных наноструктур CVD процесс с использованием в качестве катализатора частицы  $Al_2O_3$  с последующим спеканием плазмой [4, 5]. Проведенные исследования показали перспективность данного метода получения объемных нанокомпозитов на основе углеродных наноструктур. Вместе с тем показано, что повышение прочности сопровождается в ряде случаев снижением значений ударной вязкости, что по-видимому является следствием недостаточным равномерным распределением углеродных наноструктур по объему. Исследованиями выполненными в ТИСНУМ установлено, что легирование алюминиевых и термоэлектрических сплавов фуллеренами  $C_{60}$  в 1,5-2 раза повышает их твердость, прочность и износостойкость при одновременном повышении коэффициента Зеебека, а также коэффициента добротности термоэлектрических сплавов [6, 7]. Твердость и прочность композиционных сверхпроводников на основе ниобия, молибдена, диборида магния и алмаза, кубического нитрида бора, и фуллерена  $C_{60}$  повышается в несколько раз по сравнению с исходными сверхпроводниками.

Экономическая эффективность возможных результатов данной работы может быть проиллюстрирована на примере применения алюмоматричных композитов, модифицированных углеродными наноматериалами в ка-

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ  
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО  
СПЛАВОВ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

честве линий электропередач. В настоящее время, увеличение передаваемой плотности тока электросетями требует беспрецедентных вложений. Поскольку потребление электроэнергии растет, коммунальные компании должны совершенствовать существующие электросети, путем добавления новых линий электропередач или заменять существующие кабели на кабели с большим сечением и соответственно увеличивая их вес и нагрузку на опоры. В конечном итоге, они сталкиваются с необходимостью замены существующих опор на новые. Другим путем решения данной проблемы является внедрение кабелей из алюмоматричных композиционных материалов модифицированных углеродными наноматериалами. Стандартные стальные сердечники используемые в большинстве случаев перегреваются в условиях пиковых нагрузок, что приводит к растяжению кабелей и их провисанию. В противоположность им провода из алюмоматричных композитов обладают значительно более низким коэффициентом термического расширения, в совокупности с более высоким коэффициентом электропроводности могут использоваться без стального сердечника. Замена проводов со стальным сердечником на провода из алюмоматричных композитов позволяет повысить величину допустимых плотностей тока в несколько раз и как следствие обеспечить передачу больших мощностей. По оценке экспертов финансовый объем рынка данного направления превышает 50 млрд. долларов США.

Результатом проводимых исследований является создание лабораторных и (в дальнейшем) опытно-промышленных технологий получения объемных наноструктурированных материалов конструкционного и функционального назначения. Разрабатываемые материалы предназначены для применения в машиностроении (детали газовых турбин), энергетике (оболочки сверхпроводящих кабелей, тепловыделяющие элементы энергетических реакторов нового поколения), научном приборостроении (аппараты высокого давления).

Конечными потребителями планируемых результатов исследований, материалов и изделий на их основе являются приборостроительные предприятия различных ведомств, а именно: Роспром (департамент радиоэлектронной промышленности), Минатом, Роскосмос и другие.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.А. Евдокимов; В.Е. Ваганов; Д.В. Абрамов; В.Д. Захаров «Подготовка углеродного наноматериала для применения его в качестве модифицирующей добавки в различные материалы» // Патентно-лицензионная деятельность в государственном научно-образовательном секторе и организациях, образующих национальную нанотехнологическую сеть владимирской области. Сб. научных трудов. Научная конференция. Владимир 2009 г. с.60-64.
2. И.А. Евдокимов; А.В. Панфилов; В.Е. Ваганов; Панфилов А.А. «Изотропные алюмоматричные композиты с наноуглеродными материалами»// Сб. научных трудов. Шестая международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» 28-30 октября 2009 года. с. 147.
3. И.А. Евдокимов; В.Е. Ваганов; Д.В. Абрамов; В.Д. Захаров «Структура и морфология углеродных материалов полученных на установке каталитического пиролиза ВлГУ»// Вторая международная конференция молодежной школы-семинара. Сб. научных трудов. Владимир, 16-19 ноября 2009 г. с. 71-73
4. И.А. Евдокимов; В.Е. Ваганов; Д.В. Абрамов; В.Д. Захаров «О структуре некоторых металлических сплавов модифицированных углеродными наноматериалами»// Вторая международная конференция молодежной школы-семинара. Сб. научных трудов. Владимир, 16-19 ноября 2009 г. с. 76-78
5. В.Е. Ваганов; В.А. Кечин; И.А. Евдокимов «Современные достижения по получению материалов с нанокристаллической структурой»// Вестник научно-технического развития. № 6 (34), 2010 г. УДК 669; 544.2
6. Прусов Е.С., Панфилов А.В., Панфилов А.А. «термодинамический анализ и модель взаимодействия компонентов при синтезе композиционных материалов на основе систем Al-TiO<sub>2</sub>-B-SiC и TiO<sub>2</sub>-C-SiC// Литейщик России №9 за 2009 г. с. 30-33
7. Панфилов А.А., Панфилов А.В., Петрунин А.В. «Исследования влияния наночастиц тугоплавких соединений на формирование структуры и свойств алюмоматричных композиционных материалов»// Литейщик России №7 за 2008 г. с. 42-45
8. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А., Панфилов А.В. «Дисперсно-упрочненные композиционные материалы, армированные эндогенными и экзогенными керамическими интерметаллидными фазами»// Литейщик России №7 за 2008 г. с. 60-64
9. Ultrahard and superhard phases of fullerite C<sub>60</sub> : comparison with diamond on hardness and wear. V.Blank, M.Popov, G.Pivovarov, N.Lvova, K.Gogolinsky, V.Reshetov. Diamond and Related Materials. Vol. 7, No 2-5 (1998), P 427-431.
10. Кулибаба В.Ф., Батова Н.И., Прохоров В.М., Пивоваров Г.И., Соловьева Л.Ф. Применение сканирующей силовой микроскопии для исследования наноструктурных материалов. // Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) – 2004. – Сб. научных трудов. Международ-

ная научн. конф. Волгоград, 20-23 сент., 2004г, с.91.

11. Г.И. Пивоваров, В.Д. Бланк, В.М. Прохоров, Л.Ф. Соловьева, В.Ф. Кулибаба. Оценка однородности свойств наноструктурных сплавов методами микро- и наноиндентирования.// Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) – 2004. – Сб. научных трудов. Международная научн. конф. Волгоград, 20-23 сент., 2004г, с.116-117.

12. В.М. Прохоров, В.Д. Бланк, Г.И. Пивоваров, Л.Ф. Соловьева. Получение наноструктурированных сплавов алюминий – фуллерен и исследование их механических свойств.// Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) – 2004. – Сб. научных трудов. Международная научн. конф. Волгоград, 20-23 сент., 2004г, с.124-126.

13. Л.Ф. Соловьева, Н.И. Батова, Г.И. Пивоваров, В.Ф. Кулибаба, В.М. Прохоров. Исследование структуры алюминий – фуллереновых сплавов методами оптической и сканирующей силовой микроскопии.// Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) – 2004. – Сб. научных трудов. Международная научн. конф. Волгоград, 20-23 сент., 2004г, с.136-137

14. Improve the Mechanical Properties of carbon Based Ceramics by Nanocarbon/ G. Pivovarov, at all.// Book of abstracts. Second Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Nanotechnology, Safety" (SENS 2007). 07- 09 June 2007 / Varna. Bulgaria. P.102.