

Бокарёв Д.В., Аборкин А.В.  
*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и  
Николая Григорьевича Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
aborkin@vlsu.ru*

### **Влияние поверхностной модификации углеродных нанотрубок керамическими наночастицами на механические свойства алюмоматричных композитов**

Современные транспортная и авиационная промышленность нуждаются в легких и прочных материалах. Одним из наиболее востребованных в данной отрасли материалов является алюминий, который отличается низкой плотностью, высокой коррозионной стойкостью и низкими стоимостными характеристиками, однако лимитирующим фактором его применения в данных отраслях зачастую является сравнительно низкий уровень прочностных характеристик, повышения которых можно добиться введением различных наполнителей, например – углеродных нанотрубок (УНТ). Основным методом получения алюмоматричных композитов является консолидация предварительно полученных шаровым размолом порошковых смесей, однако, промышленному внедрению технологии мешают кластеризация углеродных нанотрубок в матрице, деградация нанотрубок при шаровом размоле и слабое межфазное взаимодействие Al-УНТ. Первые две проблемы решаются подбором оптимального режима получения порошковых нанокомпозитов [1]. Главным же способом улучшения межфазного взаимодействия Al-УНТ является поверхностная модификация нанотрубок с помощью создания различных металлических [2] или керамических [3, 4] слоёв на границе раздела. С позиции повышения жесткости композитов и защиты УНТ от повышенной температуры особенно перспективно получение на поверхности УНТ жестких и жаропрочных карбидных слоёв. Работа посвящена исследованию влияния промежуточных слоёв из различных карбидов на механическую прочность композиционных материалов.

Исходными материалами для получения композиционного порошка являлись гранулы алюминиевого сплава АМг2 со средним диаметром 1-2 мм и углеродные наноструктуры трёх видов: исходные углеродные нанотрубки, углеродные наноструктуры на их основе, покрытые наночастицами TiC, чья структура подробно описана в исследовании [3] и покрытые наночастицами WC углеродные нанотрубки, структура которых подробно описана в исследовании [4]. Доля упрочняющих наноструктур во всех случаях составила 0.1 вес.%. Порошковые нанокомпозиты были получены высокоэнергетическим шаровым размолем с добавлением стеариновой кислоты на планетарной шаровой мельнице PULVERISETTE 6 (Fritsch) при скорости вращения  $600 \text{ мин}^{-1}$  на протяжении 6 часов. Полученные порошки затем спрессовывались при температуре  $450^\circ\text{C}$  и давлении 350 МПа на гидравлическом прессе. Затем на электроэрозионном станке из образцов были получены образцы для испытаний на сжатие диаметром 6 мм и высотой 10 мм. Более подробно все технологические этапы получения композитных материалов описаны в работе [3]. Полученные образцы испытывались на сжатие на универсальной испытательной машине WDW-100E с соблюдением ГОСТ 25.503-97. Было испытано 3 образца каждого состава.

Морфология наполнителя была изучена с помощью метода растровой электронной микроскопии на микроскопе Zeiss 55 Ultra. Типичные изображения морфологии армирующих наноструктур и результаты расчета объемной доли наполнителя с помощью модели, представленной в исследовании [3], приведены на рис. 1. Исходные углеродные нанотрубки обладали диаметром 70-80 нм. Покрытие из наночастиц TiC диаметром 10-30 нм обладало более гладкой и сплошной морфологией по сравнению с покрытием из наночастиц WC диаметром 10-30 нм, для которого была характерна развитая морфология. Из-за наличия керамических наночастиц на поверхности УНТ объемная доля наполнителя в матричном материале снижается вдвое в случае модификации поверхности УНТ наночастицами TiC и в 4 раза в случае частиц WC.

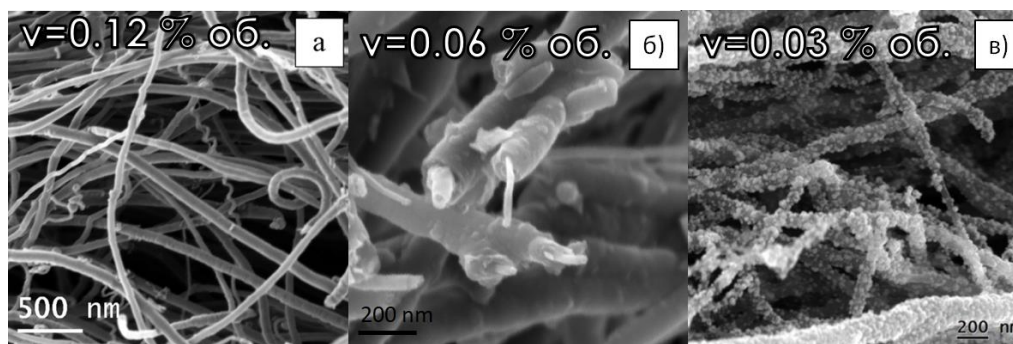


Рис.1. РЭМ-изображения: а) углеродных нанотрубок, б) покрытых частицами TiC УНТ, в) покрытых частицами WC УНТ

Результаты, характеризующие прочностные свойства композиционных материалов, а также данные об эффективности упрочнения в случае использования того или иного наполнителя приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний механических свойств полученных композитов

Состав образца	Предел текучести в условиях сжатия $\sigma_{сж}$ , МПа	Эффективность упрочнения R
АМг2 (в состоянии поставки)	150	-
АМг2 (размолотый)	480 ±9.8	-
АМг2+0.1 вес.% УНТ	604 ±9.4	215
АМг2+0.1 вес.% TiC/УНТ	600 ±8.8	417
АМг2+0.1 вес.% WC/УНТ	610 ±15.2	902

Для демонстрации влияния керамических наночастиц на предел текучести в условиях сжатия, используем такую величину, как эффективность упрочнения R [5]:  $R = \frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m \cdot v} \cdot 100\%$  (1), где  $\sigma_c$  и  $\sigma_m$  – предел текучести на сжатие композитного и матричного материала, соответственно,  $v$  – объемная доля наполнителя.

Результаты испытаний на сжатие показывают, что предел прочности сплава вырос в 3.2 раз с 150 до 480 МПа по сравнению со сплавом в состоянии поставки. Все композиты получили прирост прочности за счет наполнителя, и уровень достигнутых композитами вне зависимости от типа наполнителя примерно одинаков. При этом, эффективность упрочнения TiC/УНТ и WC/УНТ по сравнению с упрочнением обычными УНТ выше в ~2 и 4.2 раза, соответственно. Повышение физико-механических свойств объясняется защитой УНТ от механического воздействия в процессе шарового размолла и на этапе консолидации от образования  $Al_4C_3$ , улучшением межфазного взаимодействия из-за повышения работы адгезии в системах Al-TiC-УНТ и Al-WC-УНТ по сравнению с системой Al-УНТ.

Работы по синтезу и характеристике свойств композиционных материалов проведены при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 18-79-10227. Аналитический обзор и расчетные исследования выполнены в рамках программы Минобрнауки России «Содействие занятости выпускников 2020 года на научно-исследовательские позиции в образовательные организации высшего образования и научные организации».

### Литература

1. L. Lavagna et al., “Functionalization as a way to enhance dispersion of carbon nanotubes in matrices: a review,” Mater. Today Chem., vol. 20, p. 100477, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.MTSCHEM.2021.100477

2. K. Kremlev et al., “The Gas-Phase Synthesis of a New Functional Hybrid Material on the Basis of Multiwalled Carbon Nanotubes Decorated with Faceted Aluminum Nanocrystals,” *Tech. Phys. Lett.*, vol. 44, no. 10, pp. 865–868, Oct. 2018, doi: 10.1134/S1063785018100085.

3. A. V. Aborkin et al., “Thermal expansion of aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes with in-situ and ex-situ designed interfaces ceramics layers,” *J. Alloys Compd.*, vol. 872, p. 159593, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159593.

4. Sivkov D. et al., «Studies of Buried Layers and Interfaces of Tungsten Carbide Coatings on the MWCNT Surface by XPS and NEXAFS Spectroscopy». *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4736. doi: 10.3390/app10144736.

5. B. Chen et al., “In Situ Synthesized Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> Nanorods with Excellent Strengthening Effect in Aluminum Matrix Composites,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 16, no. 8, pp. 972–975, Aug. 2014, doi: 10.1002/adem.201400232.