

Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов,
В. Н. Голованов, Е. С. Климов, М. С. Ефимов

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С ДОБАВЛЕНИЕМ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК: ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА¹

Аннотация.

Актуальность и цели. В связи с развитием уровня техники и повышением требований к традиционным материалам получение и исследование композитов, упрочненных дисперсными частицами или волокнами, является актуальной задачей для зарубежных и российских ученых. При введении многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в качестве армирующего компонента в матрицу металла появляется возможность получить материал с повышенными физико-механическими характеристиками. Целью данной работы являлось исследование влияния МУНТ на структуру и механических свойств чистого алюминия.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовался порошок алюминия марки ПАД-6* чистотой 99,9 % (производство ООО «ВАЛКОМ-ПМ») и МУНТ (содержание аморфного углерода и графита не более 2 %), полученные методом МОСVD и подвергнутые функционализации, путем кислотной обработки в смеси концентрированных серной и азотной кислот. Компактирование смешанных материалов осуществлялось с использованием искроплазменного спекания в вакууме при 600 °С и давлении прессования 50 МПа с выдержкой 20 мин. Исследование композитов проводилось следующими методами: электронная микроскопия, измерение микротвердости по Виккерсу, испытание на статическое растяжение.

Результаты. Исследовано влияние различных концентраций нанотрубок на микроструктуру и механические свойства композитов. Показано, что применение функционализации улучшает однородность распределения нанотрубок в порошке алюминия и что наибольшее увеличение микротвердости и предела прочности происходит при концентрации функционализированных МУНТ 0,1 вес. %.

Ключевые слова: порошковая металлургия, многостенные углеродные нанотрубки, искроплазменное спекание, микроструктура, микротвердость, предел прочности.

N. A. Bunakov, D. V. Kozlov,
V. N. Golovanov, E. S. Klimov, M. S. Efimov

AN ALUMINUM-BASED COMPOSITE MATERIAL WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES: FABRICATION, STRUCTURE AND PROPERTIES

Abstract.

Background. Increased demands for strengthened conventional materials, capable of satisfying needs of technological advances, make the study and fabrication of composites, reinforced with dispersed particles or fibers, topical for domestic and foreign scientists. Addition of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) as a rein-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России.

forcing component in a matrix metal allows obtaining a material with high performance characteristics. The purpose of the work is to study the effect of MWCNT on the microstructure and mechanical properties of pure aluminum.

Materials and methods. The aluminum powder PAD-6* (produced by Ltd. "VALCOM-PM") with 99.9% purity and pristine MWCNTs having 2% of amorphous carbon and graphite, produced by the MOCVD method (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) and functionalized via acid treatment by the H_2SO_4/HNO_3 mixture, were used in this study. Compacting of mixed materials was performed by spark plasma sintering at 600°C under 50 MPa of applied stress for 20 min in a vacuum. The following methods were used to study the composites: electron microscopy, micro-hardness Vickers test, static tension test.

Results. The authors studied the effect of FMWCNT on the microstructure and mechanical properties of composites. It is shown that functionalization allows homogeneous dispersing of MWCNTs in the Al powder. The maximal increase in micro-hardness and tensile strength has been registered at 0.1 wt.%.

Key words: powder metallurgy, multi-walled carbon nanotubes, functionalization, spark plasma sintering, microstructure, micro-hardness, tensile strength.

Введение

Выдающиеся механические характеристики (предел прочности ~10–66 ГПа, модуль Юнга ~0,62–1,2ТПа) в сочетании с малой плотностью (~1,8 г/см³) и нанометровыми размерами позволяют рассматривать многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) как перспективный армирующий компонент [1, 2].

Известно, что основной проблемой создания композитов металл–МУНТ является высокая склонность МУНТ к агломерации, в то время как для получения высоких механических свойств необходимо однородное распределение трубок в объеме материала.

На данный момент существует множество методов получения металломатричных композитов с добавлением МУНТ: методы обработки расплава [3–5] (литье, инфильтрация расплава), методы газотермического напыления [3, 6, 7] (плазменное напыление, холодное напыление), электрохимические методы [3, 8] (электроосаждение, химическое осаждение), новые методы [3, 9–14] (смешивание порошков на молекулярном уровне, наномасштабная дисперсия, сэндвичная обработка, лазерное напыление) и т.д.

Но наиболее доступным способом получения необходимой однородности является использование приемов порошковой металлургии [3, 11–20]. Металл в виде частиц микронных размеров перемешивается с МУНТ, прессуется и спекается в компактные образцы, которые могут быть использованы для изучения свойств и структуры.

Обычно при получении композитов на основе металлов используются МУНТ в исходном состоянии (полученные методом CVD, MOCVD и т.д.). В некоторых работах указывается на применение функционализации МУНТ с целью прививки к поверхности полярных групп, что позволит получить более устойчивую дисперсную среду в полярных растворителях, увеличить химическую активность и повысить связь с матрицей металла [12–14].

В работе использовались МУНТ в исходном состоянии и после процесса функционализации. При этом оказалось, что во втором варианте удастся достичь более однородного распределения нанотрубок в порошке алюминия.

В ряде работ [3, 12–18] наибольшее упрочнение металлических матриц достигается при добавлении нанотрубок не более 1 вес.%. В связи с чем в работе были выбраны концентрации нанотрубок в пределах 0,1–1 вес. %.

В данном исследовании показано влияние различных концентраций функционализированных МУНТ (ФМУНТ) на микроструктуру и механические свойства композитов.

1. Методика эксперимента

В качестве исходных материалов использовался порошок алюминия марки ПАД-6* чистотой 99,9 % (производство ООО «ВАЛКОМ-ПМ») и МУНТ (содержание аморфного углерода и графита не более 2 %), полученные методом МОСVD [21].

Процесс функционализации исходных МУНТ проводился в смеси концентрированных серной и азотной кислот в объемном соотношении (3:1) при 90 °С в течение 90 мин) [22].

На втором этапе с помощью ультразвуковой обработки (УЗ) были подготовлены дисперсии нанотрубок и алюминиевого порошка в этаноле, которые тут же смешивались, а затем еще раз подвергались УЗ и интенсивному перемешиванию с последующей сушкой.

Для экспериментов были подготовлены композитные смеси с концентрациями ФМУНТ 0,1; 0,25; 0,5; 1 вес.% соответственно, а также контрольный образец чистого алюминия, обработанный по той же технологии.

На третьем этапе были получены компактные образцы путем искроплазменного спекания (ИПС) порошков в вакууме при 600 °С и давлении прессования 50 МПа с выдержкой 20 мин.

Таким образом, были получены цилиндрические образцы размерами Ø20×10 мм и Ø10×20 мм (рис. 1).

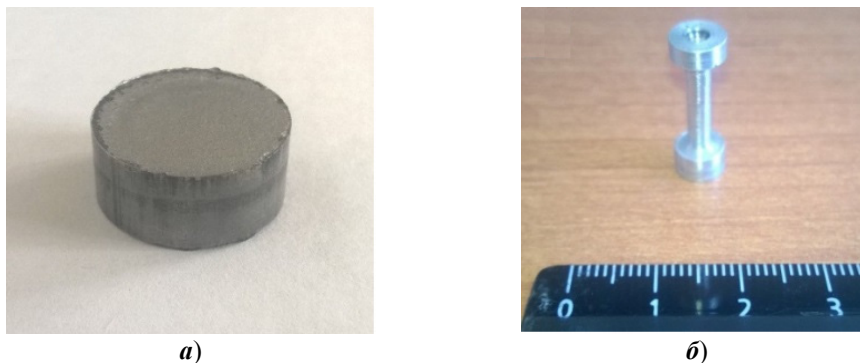


Рис. 1. Образцы после ИПС: *а* – образец Ø20×10 мм; *б* – образец для испытания на растяжение, изготовленный из цилиндра Ø10×20 мм

Гранулометрический состав порошков производился с использованием лазерного анализатора размеров частиц Microtrac Bluewave.

Исследование фазового состава исходных порошков осуществлялось на дифрактометре Bruker D2 PHASER.

Структура композитных смесей и компактных образцов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) PHENOM Pro X.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере Qness Q10M методом Виккерса.

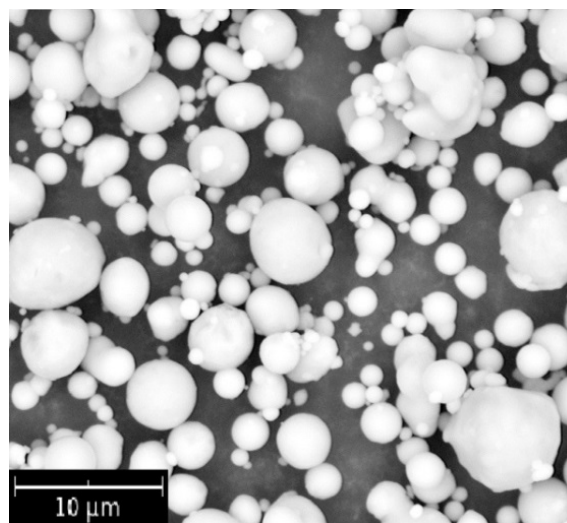
Испытание образцов на растяжение проводилось с использованием электромеханической испытательной машины Walter+Bai LFM (max. load 125 kN).

2. Результаты

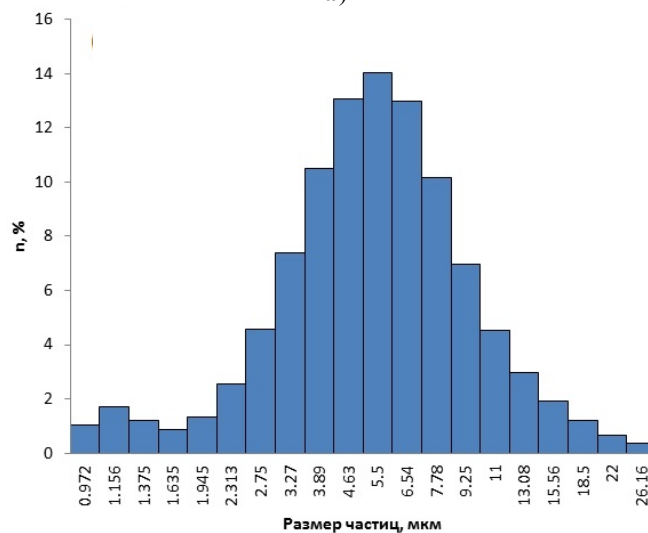
2.1. Характеристика используемых материалов

Алюминий

На рис. 2,*a* представлено СЭМ-изображение исходного порошка алюминия. В большей степени порошок состоит из частиц сферической формы средним размером 6 мкм.



a)



б)

Рис. 2. СЭМ-изображение исходного порошка алюминия (*a*) и распределение частиц по размерам (*б*)

С помощью гранулометрического анализа установлено, что размер большинства частиц лежит в интервале 2–12 мкм (рис. 2,б). Результаты исследования порошка алюминия методом рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о наличии рефлексов, характерных для чистого алюминия, с минимальным содержанием примесей.

Многостенные углеродные нанотрубки

Используемый препарат МУНТ представляет собой трубки диаметром 20–160 нм, большая часть которых 40–80 нм, что также подтверждается методом рентгеновского малоуглового рассеяния [23].

Функционализация путем прививки на поверхности МУНТ полярных групп ($-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{COOH}$) обычно проводится по максимальному накоплению карбоксильных групп на поверхности трубок. Максимальное количество $-\text{COOH}$ групп составляет ~4 вес.% [23].

В исходном виде МУНТ находятся в виде плотных агломераций (ориентированных жгутов) толщиной до 100 мкм и длиной до 1 мм, которые сформированы из длинных нитей, образованных углеродными нанотрубками (рис. 3,а).

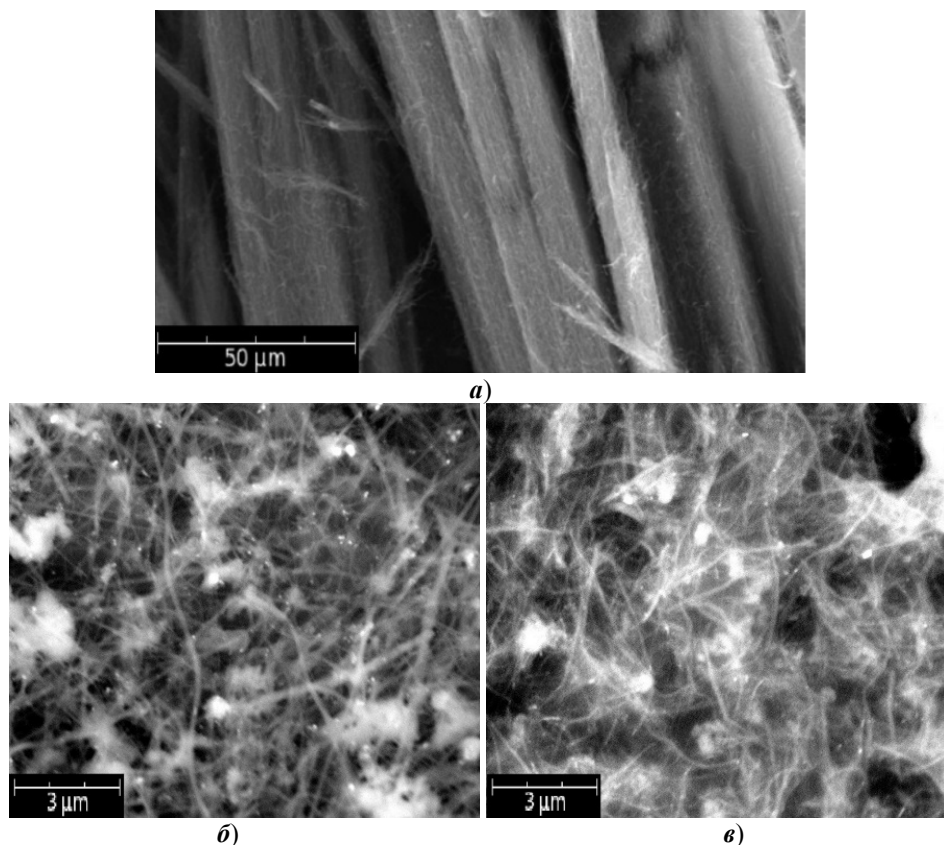


Рис. 3. СЭМ-изображения жгутов исходных МУНТ (а), исходных МУНТ после УЗ (б), ФМУНТ после УЗ (в)

При ультразвуковой обработке происходит расщепление жгутов и дробление нитей на более короткие фрагменты. Длина исходных МУНТ по-

сле УЗ составляет десятки микрон (рис. 3,б). ФМУНТ имеют меньшую длину (4–12 мкм) в связи с особенностью их получения (рис. 3,в).

Как в исходных МУНТ, так и в ФМУНТ заметны частицы (рис. 3,б,в), которые индифицировались с помощью рентгеноструктурного анализа как Fe_3C ($2\Theta \approx 38^\circ$ и 44°) и $\gamma\text{-Fe}$ ($2\Theta \approx 45^\circ$) (рис. 4). Обнаружение данных фаз объясняется использованием ферроцена в качестве катализатора при получении нанотрубок [21]. Основной пик на дифрактограммах ($2\Theta = 26^\circ$) соответствует дифракции на плоскостях, образуемых sp^2 -углеродными графеновыми слоями. К МУНТ относятся также слабые пики $2\Theta \approx 43^\circ$ и 54° (рис. 4). Результаты рентгеноструктурного анализа согласуются с литературными данными для этого типа нанотрубок [24, 25]. Содержание железа в исходных МУНТ составляет 1,5–1,7 % по массе. При этом после проведения функционализации содержание железа уменьшается до 0,5 % по массе [22].

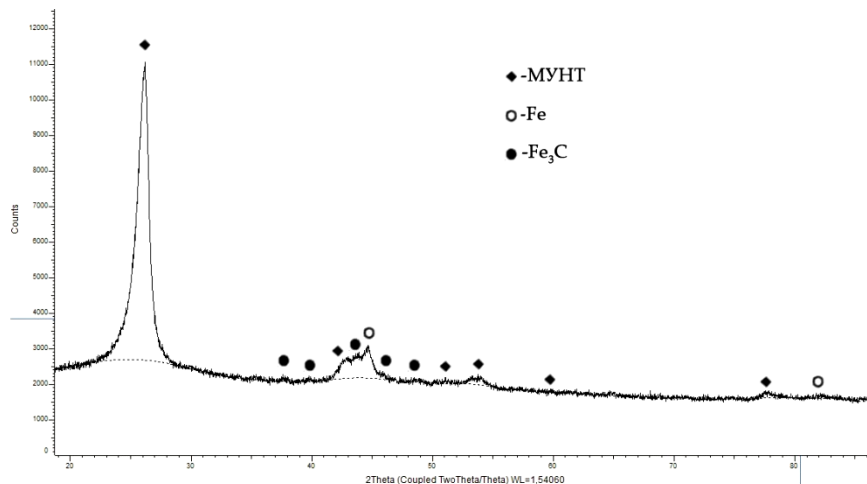


Рис. 4. Дифрактограмма исходных МУНТ

2.2. Распределение МУНТ в порошке алюминия

Однородность распределения нанотрубок в композитных смесях оценивалась по СЭМ изображениям (рис. 5). В образце с исходными МУНТ видны многочисленные крупные агломерации размером 20–50 мкм (рис. 5,а,б). В случае использования ФМУНТ наблюдаются отдельные трубки длиной 4–8 мкм, равномерно распределенные в порошке алюминия (рис. 5,в,г), и небольшое количество агломераций существенно меньшего размера (2–4 мкм), концентрация которых уменьшается вместе с уменьшением концентрации нанотрубок (рис. 6,в,г, см. стрелки).

3. Микроструктура Ал/ФМУНТ после ИПС

В образце чистого алюминия (контрольного образца) заметны небольшие поры размером 300–700 нм и отсутствуют границы между исходными частицами порошка (рис. 6,а). При увеличении концентрации ФМУНТ протяженность границ между исходными частицами увеличивается (рис. 6,б,в,г). Это свидетельствует о существенном влиянии нанотрубок на процесс спекания алюминиевого порошка. Толщина границ составляет 100–400 нм.

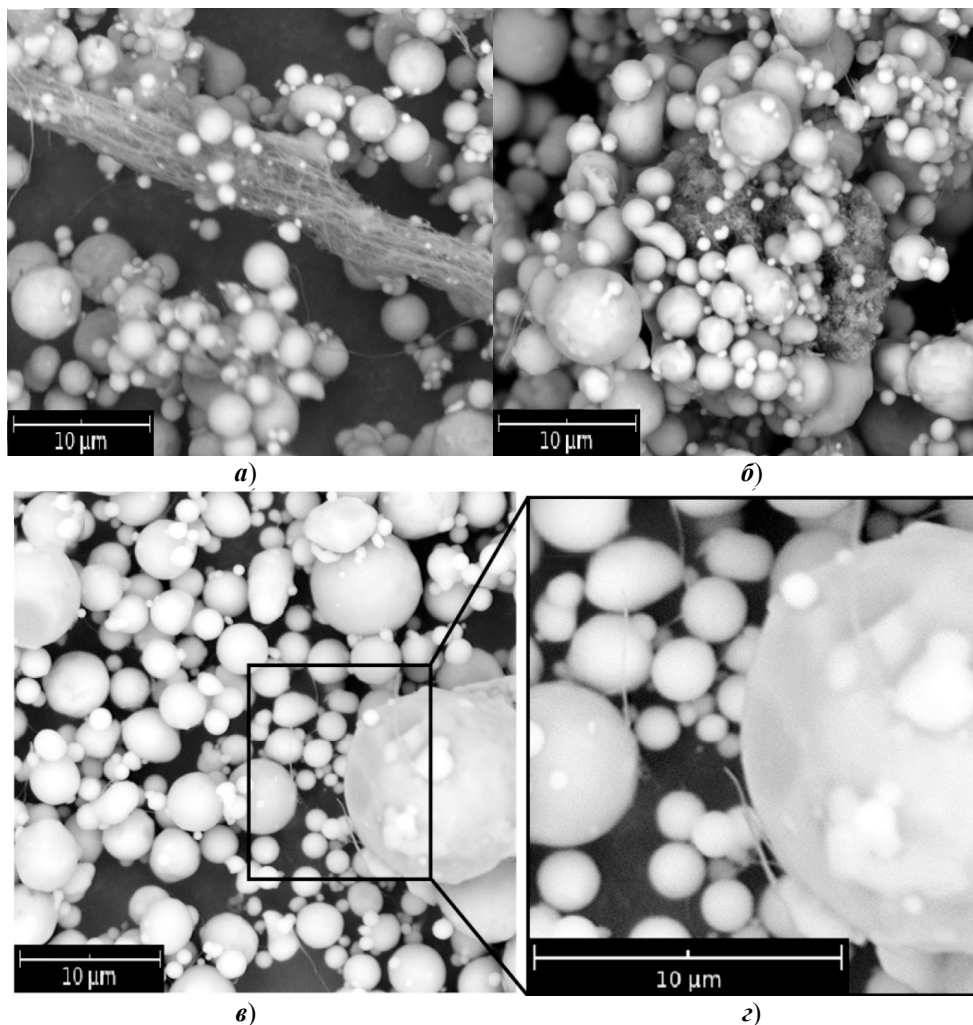


Рис. 5. СЭМ-изображения композитных смесей: *а, б* – Ал/0,5 вес.% исх. МУНТ; *в, г* – Ал/0,5 вес.% ФМУНТ

Исследование микроструктуры в зависимости от времени выдержки при ИПС проводилось на образце Ал/0,5 вес.% ФМУНТ (рис. 7). С увеличением времени спекания протяженность границ уменьшается, и при 40-минутной выдержке границы между исходными частицами порошка алюминия исчезают (рис. 7,г). Возможно, что исчезновение границ связано с разрушением оксида алюминия с поверхности частиц порошка за счет ИПС [11–14]. На рис. 7,г видно, что при длительном спекании структура композита насыщена большим количеством включений, содержащих нанотрубки, частицы оксида алюминия, газовые поры и т.п.

4. Механические свойства

В табл. 1 приведены механические свойства исследуемых образцов после ИПС. Для микротвердости HV и предела прочности σ_B прослеживается взаимная корреляция, и максимальные значения достигаются при добавлении 0,1 вес.% ФМУНТ. Прирост составляет 16 % для микротвердости и 30 % для

предела прочности по отношению к алюминию без нанотрубок. Микротвердость в зависимости от времени спекания не изменяется, и для образца Ал/0,5 вес.% ФМУНТ составляет $HV = 45$ МПа. Относительное удлинение образцов уменьшается с увеличением концентраций ФМУНТ, что, скорее всего, связано с увеличением размеров и количества агломераций нанотрубок. Для композита с наибольшим пределом прочности пластичность сохраняется на уровне ($\delta \sim 13\%$). Значения пределов текучести $\sigma_{0,2}$ лежат в интервале 85–101 МПа.

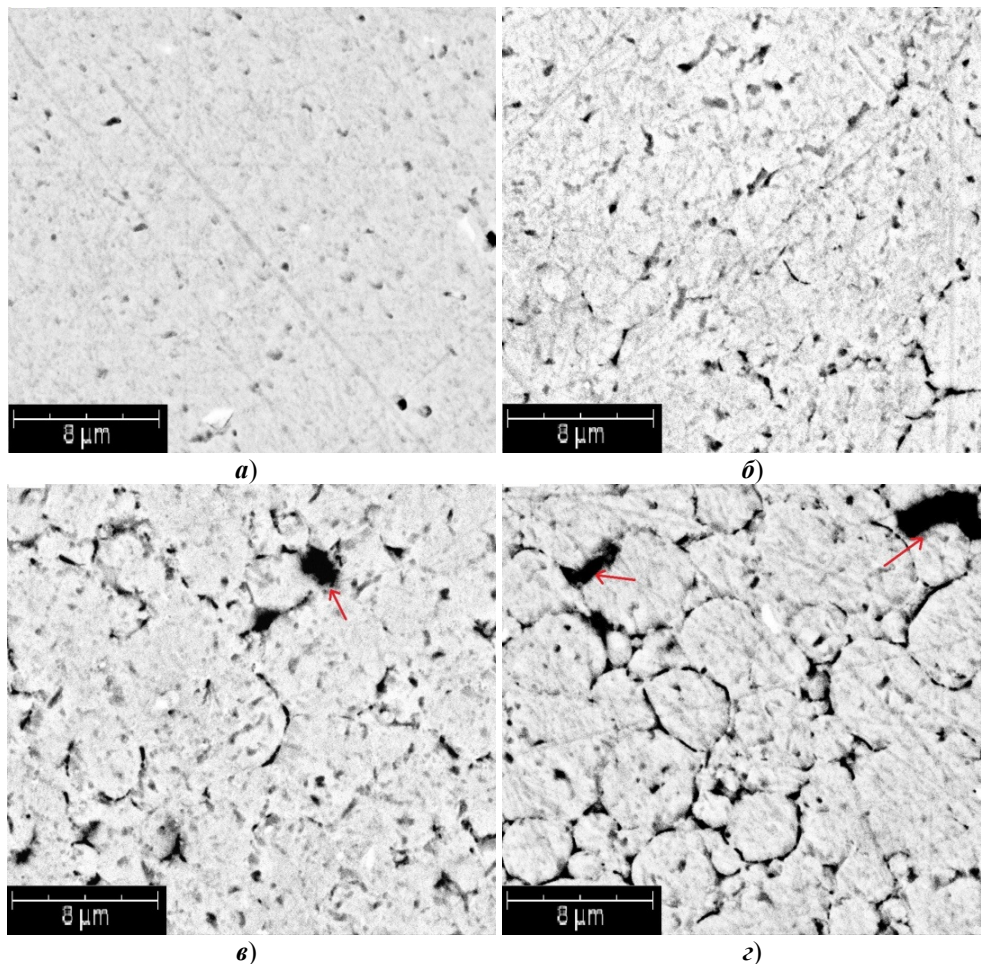


Рис. 6. СЭМ-изображения микроструктуры поперечного среза таблеток после ИПС при 600 °С, выдержка 20 мин: *a* – Ал/0 вес.% ФМУНТ (контр.обр.); *б* – Ал/0,1 вес.% ФМУНТ; *в* – Ал/0,5 вес.% ФМУНТ; *г* – Ал/1 вес.% ФМУНТ

Заключение

Обнаружено влияние концентрации нанотрубок на спекание частиц порошкового алюминия. Приведены результаты исследования микроструктуры в зависимости от времени выдержки при ИПС.

Показано, что добавление 0,1 вес.% ФМУНТ приводит к приросту микротвердости и предела прочности чистого алюминия на 16 и 30 % соответ-

ственно. С целью изучения микроструктуры композитов, характера взаимодействия ФМУНТ с алюминиевой матрицей планируются дополнительные исследования с помощью ПЭМ.

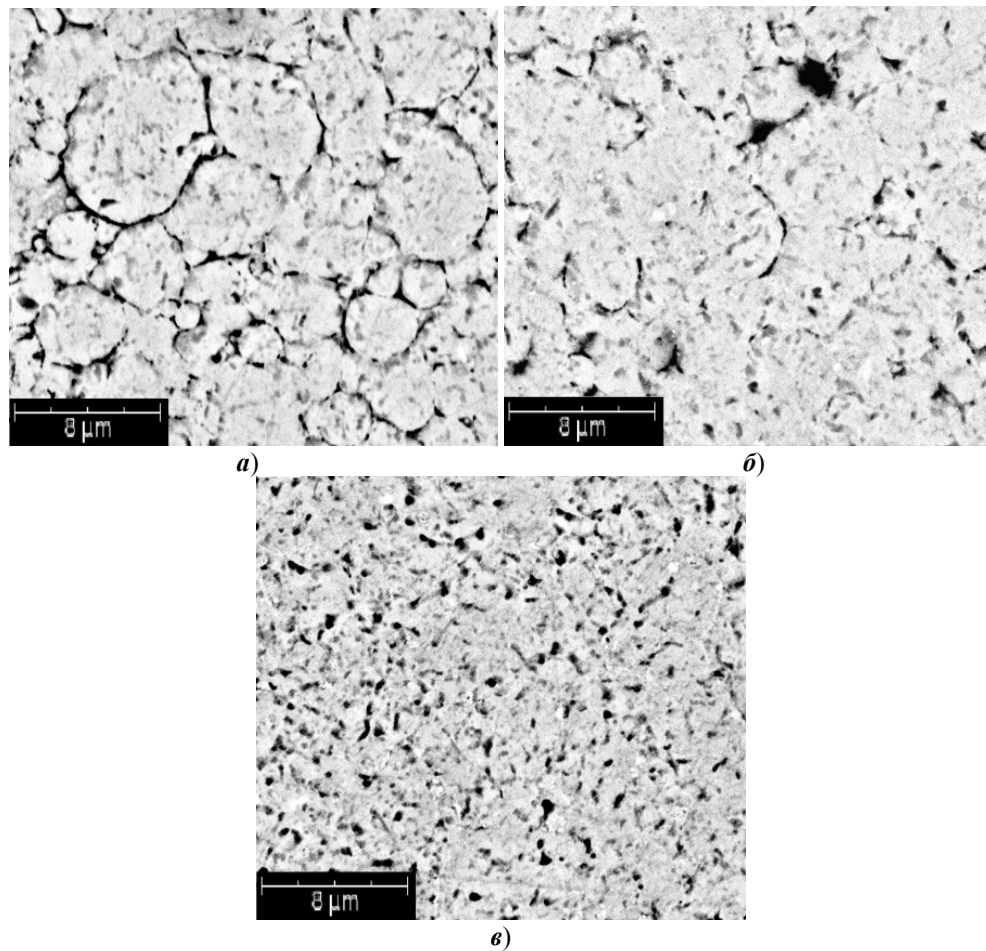


Рис. 7. СЭМ-изображения Ал/0.5 вес.% ФМУНТ после ИПС при 600 °С:
а – выдержка 5 мин; *б* – выдержка 20 мин; *в* – выдержка 40 мин

Таблица 1
 Механические характеристики композитов Ал/ФМУНТ после ИПС

Образец	Характеристика			
	HV, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
Ал/0 вес.% ФМУНТ 600 °С, 20 мин (контр.обр.)	43	126	97	24
Ал/0,1 вес.% ФМУНТ 600 °С, 20 мин	50	163	101	13
Ал/0,25 вес.% ФМУНТ 600 °С, 20 мин	47	151	85	6
Ал/0,5 вес.% ФМУНТ 600 °С, 20 мин	45	146	100	11
Ал/1 вес.% ФМУНТ 600 °С, 20 мин	46	132	87	4
Ал/0,5 вес.% ФМУНТ 600 °С, 5 мин	45	—	—	—
Ал/0,5 вес.% ФМУНТ 600 °С, 40 мин	45	—	—	—

Повышение эффективности методов введения нанотрубок в матрицу алюминия позволит дополнительно улучшить механические свойства композитов.

Список литературы

1. **Раков, Э. Г.** Нанотрубки и фуллерены : учеб пособие / Э. Г. Раков. – М. : Логос, 2006. – С. 376.
2. **Булярский, С. В.** Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение : моногр. / С. В. Булярский. – Ульяновск : Стрежень, 2011. – С. 478.
3. **Agarwal, A.** Carbon nanotubes – reinforced metal matrix composites / A. Agarwal, S. R. Bakshi, D. Lahiri. – CRC Press., 2010. – P. 325
4. Fabrication and tribological properties of carbon nanotubes reinforced Al composites prepared by pressureless infiltration technique / S.-M. Zhou, X.-B. Zhang, Z.-P. Ding, C.-Y. Min, G.-L. Xu and W.-M. Zhu // *Composites A*. – 2007. – Vol. 38. – P. 301–306.
5. Fabrication process of carbon nanotube/light-metal matrix composites by squeeze casting / H. Uozumi, K. Kobayashi, K. Nakanishi, T. Matsunaga, K. Shinozaki, H. Sakamoto, T. Tsukada, C. Masuda and M. Yoshida // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2008. – Vol. 495. – P. 282–287.
6. **Bakshi, S. R.** Aluminum composite reinforced with multiwalled carbon nanotubes from plasma spraying of spray dried powders / S. R. Bakshi, V. Singh, S. Seal and A. Agarwal // *Surf. Coat. Tech.* – 2009. – Vol. 203. – P. 1544–1554.
7. **Laha, T.** Carbon nanotube reinforced aluminum nanocomposite via plasma and high velocity oxy-fuel spray forming / T. Laha, Y. Liu and A. Agarwal // *J. Nanosci. Nanotech.* – 2007. – Vol. 7. – P. 1–10.
8. Preparation of Ni-CNT composite coatings on aluminum substrate and its friction and wear behaviour / J. P. Tu, L. P. Zhu, W. X. Chen, X. B. Zhao, F. Liu and X. B. Zhang // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2004. – Vol. 14, № 5. – P. 880–884.
9. Extraordinary strengthening effect of carbon nanotubes in metal-matrix nanocomposites processed by molecular-level mixing / S. I. Cha, K. T. Kim, S. N. Arshad, C. B. Mo and S. H. Hong // *Adv. Mater.* – 2005. – Vol. 17. – P. 1377–1381.
10. Получение компактного материала алюминий-углеродные нановолокна методом горячего прессования / Т. С. Кольцова, Ф. М. Шахов, А. А. Возняковский, А. И. Ляшков, О. В. Толочко, А. Г. Насибулин, А. И. Рудской, В. Г. Михайлов // *Журнал технической физики*. – 2014. – Т. 84, № 11. – С. 47–51.
11. **Kwon, H.** Effect of Spark Plasma Sintering in Fabricating Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials / H. Kwon, A. Kawasaki // *Advances in Composite Materials for Medicine and Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 15. – P. 419–444.
12. **Kurita, H.** Multi-Walled Carbon Nanotube-Aluminum Matrix Composites Prepared by Combination of Hetero-Agglomeration Method, Spark Plasma Sintering and Hot Extrusion / H. Kurita, H. Kwon, M. Estili, A. Kawasaki // *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52, № 10. – P. 1960–1965.
13. Load-bearing contribution of multi-walled carbon nanotubes on tensile response of aluminum / H. Kurita, M. Estili, H. Kwon, T. Miyazaki, W. Zhou, J.-F. Silvain, A. Kawasaki // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2015. – Vol. 68. – P. 133–139.
14. Interface and interfacial reactions in multiwalled carbon nanotube- reinforced aluminum matrix composites / W. Zhou, S. Bang, H. Kurita, T. Miyazaki, Y. Fan, A. Kawasaki // *Carbon*. – 2016. – Vol. 96. – P. 919–928.
15. Fabrication and mechanical properties of MWCNTs-reinforced aluminum composites by hot extrusion / M. Mortazavi, G. H. Majzoobi, A. N. Golikand, A. Reihani, S. Z. Mortazavi, M. S. Gorji // *Rare metals*. – 2012. – Vol. 31, № 4. – P. 372–378.

16. Effect of ball-milling time on mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites / Z. Y. Liu, S. J. Xu, B. L. Xiao, P. Xue, W. G. Wang, Z. Y. Ma // *Composites. Part A*. – 2012. – Vol. 43. – P. 2161–2168.
17. **Огнев, А. Ю.** Упрочнение алюминия и полимерных материалов углеродными нанотрубками : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Огнев А. Ю. – Новосибирск : Изд-во НГТУ. – 2011. – С. 19.
18. **Udupa, G.** Fabrication of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Aluminium Matrix Laminate by Mechanical Powder Metallurgy Technique. Part I / G. Udupa, S. S. Rao, K. V. Gangadharan // *J. Material Sci. Eng.* – 2015. – Vol. 4, № 3.
19. **Stein, J.** High-Performance Metal Matrix Composites Reinforced by Carbon Nanotubes / J. Stein, B. Lenczowski, N. Fréty, N. Anglaret // 18th International Conference on Composite Materials. – Copenhagen, 2013. – P. 1–5.
20. **Suryanarayana, C.** Mechanical Alloying / C. Suryanarayana // *Non-Equilibrium Processing of Materials*. – Oxford : Elsevier Science Ltd, 1999.
21. Some Aspects of the Synthesis of Multiwalled Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition and Characteristics of the Material Obtained / E. S. Klimov, M. V. Buzaeva, O. A. Davydova, I. A. Makarova, V. V. Svetukhin, D. V. Kozlov, E. S. Pchelintseva, N. A. Bunakov // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – Vol. 87, № 8. – P. 1109–1113.
22. Изменение поверхности и некоторых технологических свойств углеродных нанотрубок при их модифицировании / Е. С. Климов, О. А. Давыдова, М. В. Бузаева, И. А. Макарова, Д. В. Козлов, Н. А. Бунаков, Н. А. Нищев, А. А. Панов, А. А. Пыненков // *Башкирский химический журнал*. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 109–113.
23. Изменение структуры многостенных углеродных нанотрубок при физико-химической обработке / Е. С. Климов, А. В. Исаев, К. Н. Нищев, А. А. Пыненков, Д. А. Горин, Д. Н. Браташов, О. А. Давыдова, М. В. Бузаева, Е. С. Ваганова // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2014. – Т. 16, № 4 (3). – С. 568–571.
24. Модифицирование методом МОСVD поверхности многостенных углеродных нанотрубок с целью придания им необходимых физико-химических свойств / А. М. Обьедков, Б. С. Каверин, С. А. Гусев и др. // *Поверхность*. – 2009. – № 7. – С. 61–66.
25. Miyata, Y. Optical Evaluation of the Metal-to-Semiconductor Ratio of Single-Wall Carbon Nanotubes / Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura // *J. Phys. Chem. C*. – 2008. – Vol. 112. – P. 15997–16001.

References

1. Rakov E. G. *Nanotrubki i fullereny: ucheb posobie* [Nanotubes and fullerenes: tutorial]. Moscow: Logos, 2006, p. 376.
2. Bulyarskiy S. V. *Uglerodnye nanotrubki: tekhnologiya, upravlenie svoystvami, primeneniye: monogr.* [Carbon nanotubes: technology, properties control, application: monograph]. Ulyanovsk: Strezhen', 2011, p. 478.
3. Agarwal A., Bakshi S. R., Lahiri D. *Carbon nanotubes – reinforced metal matrix composites*. CRC Press., 2010, p. 325
4. Zhou S.-M., Zhang X.-B., Ding Z.-P., Min C.-Y., Xu G.-L. and Zhu W.-M. *Composites A*. 2007, vol. 38, pp. 301–306.
5. Uozumi H., Kobayashi K., Nakanishi K., Matsunaga T., Shinozaki K., Sakamoto H., Tsukada T., Masuda C. and Yoshida M. *Mater. Sci. Eng. A*. 2008, vol. 495, pp. 282–287.
6. Bakshi S. R., Singh V., Seal S. and Agarwal A. *Surf. Coat. Tech.* 2009, vol. 203, pp. 1544–1554.
7. Laha T., Liu Y. and Agarwal A. *J. Nanosci. Nanotech.* 2007, vol. 7, pp. 1–10.

8. Tu J. P., Zhu L. P., Chen W. X., Zhao X. B., Liu F. and Zhang X. B. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2004, vol. 14, no. 5, pp. 880–884.
9. Cha S. I., Kim K. T., Arshad S. N., Mo C. B. and Hong S. H. *Adv. Mater.* 2005, vol. 17, pp. 1377–1381.
10. Kol'tsova T. S., Shakhov F. M., Voznyakovskiy A. A., Lyashkov A. I., Tolochko O. V., Nasibulin A. G., Rudskoy A. I., Mikhaylov V. G. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics]. 2014, vol. 84, no. 11, pp. 47–51.
11. Kwon H., Kawasaki A. *Advances in Composite Materials for Medicine and Nanotechnology*. 2011, vol. 15, pp. 419–444.
12. Kurita H., Kwon H., Estili M., Kawasaki A. *Materials Transactions*. 2011, vol. 52, no. 10, pp. 1960–1965.
13. Kurita H., Estili M., Kwon H., Miyazaki T., Zhou W., Silvain J-F., Kawasaki A. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015, vol. 68, pp. 133–139.
14. Zhou W., Bang S., Kurita H., Miyazaki T., Fan Y., Kawasaki A. *Carbon*. 2016, vol. 96, pp. 919–928.
15. Mortazavi M., Majzoobi G. H., Golikand A. N., Reihani A., Mortazavi S. Z., Gorji M. S. *Rare metals*. 2012, vol. 31, no. 4, pp. 372–378.
16. Liu Z. Y., Xu S. J., Xiao B. L., Xue P., Wang W. G., Ma Z. Y. *Composites. Part A*. 2012, vol. 43, pp. 2161–2168.
17. Ognev A. Yu. *Uprochnenie alyuminiya i polimernykh materialov uglerodnymi nanotrubkami: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Hardening of aluminum and polymer materials by carbon nanotubes: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011, p. 19.
18. Udupa G., Rao S. S., Gangadharan K. V. *J. Material Sci. Eng.* 2015, vol. 4, no. 3.
19. Stein J., Lenczowski B., Fréty N., Anglaret N. *18th International Conference on Composite Materials*. Copenhagen, 2013, pp. 1–5.
20. Suryanarayana C. *Non-Equilibrium Processing of Materials*. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.
21. Klimov E. S., Buzaeva M. V., Davydova O. A., Makarova I. A., Svetukhin V. V., Kozlov D. V., Pchelintseva E. S., Bunakov N. A. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014, vol. 87, no. 8, pp. 1109–1113.
22. Klimov E. S., Davydova O. A., Buzaeva M. V., Makarova I. A., Kozlov D. V., Bunakov N. A., Nishchev N. A., Panov A. A., Pynenkov A. A. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal* [Bashkir chemical journal]. 2014, vol. 21, no. 3, pp. 109–113.
23. Klimov E. S., Isaev A. V., Nishchev K. N., Pynenkov A. A., Gorin D. A., Bratashov D. N., Davydova O. A., Buzaeva M. V., Vaganova E. S. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of Samara University of RAS]. 2014, vol. 16, no. 4 (3), pp. 568–571.
24. Ob'edkov A. M., Kaverin B. S., Gusev S. A. et al. *Poverkhnost'* [Surface]. 2009, no. 7, pp. 61–66.
25. Miyata Y., Yanagi K., Maniwa Y., Kataura H. *J. Phys. Chem. C*. 2008, vol. 112, pp. 15997–16001.

Бунаков Никита Андреевич

аспирант, инженер-исследователь,
Научно-исследовательский
технологический институт
имени С. П. Капицы, Ульяновский
государственный университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: na_bunakov@mail.ru

Bunakov Nikita Andreevich

Postgraduate student, research engineer,
Research Technological Institute
named after S. P. Kapitsa, Ulyanovsk State
University (42 Lva Tolstogo street,
Ulyanovsk, Russia)

Козлов Дмитрий Владимирович

кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории материаловедения, Научно-исследовательский технологический институт имени С. П. Капицы, Ульяновский государственный университет (Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: kozlovdv@ulsu.ru

Голованов Виктор Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физического материаловедения, проректор по научной работе и информационным технологиям, Ульяновский государственный университет (Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: golovanovvn@ulsu.ru

Климов Евгений Семенович

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой химии, технологии композиционных материалов и промышленной экологии, Ульяновский государственный технический университет (Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

E-mail: eugen1947@mail.ru

Ефимов Михаил Сергеевич

студент, стажер-исследователь, Научно-исследовательский технологический институт имени С. П. Капицы, Ульяновский государственный университет (Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: efimovmix@mail.ru

Kozlov Dmitriy Vladimirovich

Candidate of physical and mathematical sciences, head of laboratory of materials science, Research Technological Institute named after S. P. Kapitsa, Ulyanovsk State University (42 Lva Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

Golovanov Viktor Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of sub-department of material physics, vice president for academic research and information technology, Ulyanovsk State University (42 Lva Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

Klimov Evgeniy Semenovich

Doctor of chemical sciences, professor, head of sub-department of chemistry, composite materials technology and industrial ecology, Ulyanovsk State Technical University (32 Severniy Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Efimov Mikhail Sergeevich

Student, research assistant, Research Technological Institute named after S. P. Kapitsa, Ulyanovsk State University (42 Lva Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

УДК 621.762

Композиционный материал на основе алюминия с добавлением многостенных углеродных нанотрубок: получение, структура, свойства / Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов, В. Н. Голованов, Е. С. Климов, М. С. Ефимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 134–146. DOI 10.21685/2072-3040-2016-2-11