

Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов, В. Н. Голованов,
М. С. Ефимов, И. С. Белобров, А. А. Адамович, Д. Е. Сугак

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «АЛЮМИНИЙ – МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ» ПОСЛЕ ИСКРО-ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Развитие науки и техники предъявляет повышенные требования к материалам конструкционного и функционального назначения. Значительных успехов в этой области удалось достичь благодаря замене традиционных материалов на композиты с металлической матрицей, упрочненные дисперсными частицами и волокнами. Создание композитов с добавлением многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в качестве упрочняющей фазы может служить основой для появления материалов с уникальным сочетанием физико-механических свойств. Но создание таких композитов требует проведения экспериментальных исследований по отработке технологических режимов их получения и изучения вопросов, связанных с влиянием исходного состояния компонентов и особенностей технологии на получаемые свойства. Целью данной работы являлось исследование микроструктурных изменений в композите на основе алюминиевой матрицы при добавлении МУНТ в процессе искро-плазменного спекания (ИПС).

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 искро-плазменного спекания в вакууме при 600 °С и давлении прессования 50 МПа с выдержкой 20 мин. Исследование композитов проводилось следующими методами: сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия.

Результаты. Методами электронной и просвечивающей микроскопии проведены исследования образцов алюмоматричного композиционного материала с МУНТ. Выявлены особенности изменений микроструктуры, происходящих при получении композита в установке ИПС. Показано, что ИПС позволяет добиться разрушения слоя Al_2O_3 на частицах порошка металла. Также установлено, что добавление и увеличение содержания МУНТ в матрицу снижает эффективность разрушения данного слоя. Обнаружено, что на сохранность структуры МУНТ после спекания влияет поверхностная обработка нанотрубок на этапе их получения.

¹ Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-43-732005 р_м.

© Бунаков Н. А., Козлов Д. В., Голованов В. Н., Ефимов М. С., Белобров И. С., Адамович А. А., Сугак Д. Е., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Ключевые слова: порошковая металлургия, многостенные углеродные нанотрубки, искроплазменное спекание, микроструктура, просвечивающая электронная микроскопия.

*N. A. Bunakov, D. V. Kozlov, V. N. Golovanov,
M. S. Efimov, I. S. Belobrov, A. A. Adamovich, D. E. Sugak*

MICROSTRUCTURAL FEATURES OF THE COMPOSITE MATERIAL "ALUMINUM - MULTI-WALL CARBON NANOTUBES" AFTER SPARK PLASMA SINTERING

Abstract.

Background. Rapid progress in science and techniques requires unique performance characteristics of the structural and functional materials. Metal matrix composites strengthened by dispersed particles and fibers replacing conventional materials are responsible for the breakthrough advances in this field. Composites with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) added as a hardening phase can launch development of materials demonstrating unique combination of physical and chemical properties. On the other hand, manufacturing of such composites requires experimental studies to elaborate technological regimes enabling development of materials with the required properties and to study relation between the initial state of components and technological aspects of their processing to the performance characteristics obtained. In this work, microstructural changes in the aluminum matrix composite by MWCNTs adding in the process of spark-plasma sintering (IPA) have been studied.

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

Results. Samples of aluminum matrix composite with MWNTs have been studied by electron and transmission microscopy. Microstructural changes of the composite obtained during spark-plasma sintering are described. It is shown that SPS allows destruction of Al_2O_3 layer on the metal powder particles. Also, we demonstrate that addition of MWNTs and increase of their concentration in the matrix reduces efficiency of the layer destruction. It is found that the intactness of MWNTs structure after SPS depends on the surface treatment of nanotubes at the stage of their preparation.

Keywords: powder metallurgy, multi-walled carbon nanotubes, spark plasma sintering, microstructure, transmission electron microscopy.

Введение

Среди наноразмерных упрочнителей композиционных материалов особое место занимают многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Их уникальные свойства [1] могут служить основой для разработки материалов, сочетающих целый ряд необычных (для одного материала) физико-механических свойств, таких как высокая удельная прочность, анизотропная тепло- и электропроводность и т.п. При этом во многих исследованиях показано, что даже небольшие (0,01–1 %) добавки МУНТ могут существенно из-

менять свойства исходных материалов. В статье рассматривается способ получения и свойства композиционного материала, представляющего собой смесь алюминия и МУНТ.

Наиболее доступным способом получения композитов Al-МУНТ, при котором возможно достижение необходимой однородности смеси, является использование приемов порошковой металлургии [2]. Спекание порошков может проводиться различными методами, но перспективным и эффективным способом в настоящее время является метод искро-плазменного спекания (ИПС). ИПС является менее энергозатратным методом для получения высокоплотных композитов, в то время как при обычном спекании и горячем прессовании для достижения необходимой плотности и свойств требуются, как правило, большое давление прессования, длительная выдержка и дополнительные деформационные обработки [3].

В данном исследовании показано влияние различных концентраций МУНТ на микроструктуру композитов при ИПС.

1. Материалы и методика эксперимента

В качестве исходных материалов использовался порошок алюминия марки ПАД-6* чистотой не менее 99,4 %, размером ~2–6 мкм (производство ООО «ВАЛКОМ-ПМ»). Использовались как исходные МУНТ, так и функционализированные МУНТ (ФМУНТ). Процесс функционализации исходных МУНТ проводился в смеси концентрированных серной и азотной кислот в объемном соотношении (3:1) при 90 °C в течение 90 мин) [4, 5].

Получение равномерного распределения МУНТ в порошке алюминия проводилось путем смешивания дисперсий исходных материалов в этаноле под воздействием ультразвука (УЗ) с последующей сушкой [6].

Консолидация высушенных порошков выполнялась путем ИПС в вакууме при 600 °C со скоростью нагрева 40 °C/мин и давлении прессования 50 МПа. Время спекания ($t_{\text{сп}}$) 20 мин. В эксперименте использовался импульсный постоянный ток, подаваемый группами из 12 импульсов, за которыми следовало 2 периода отключения. Длительность импульса составляла 3 мс, время отключения – 2 мс.

Для экспериментов были подготовлены композиты с концентрациями МУНТ 0,1 масс.%, 0,25 масс.%, 0,5 масс.%, 1 масс.% соответственно, а также контрольный образец чистого алюминия, обработанный по той же технологии.

Плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания в спирте на аналитических весах. Масса образцов измерялась с точностью до 10^{-3} г.

Структура компактных образцов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) PHENOM ProX.

Высокоразрешающее исследование микроструктуры проводилось на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) FEI Tecnai G2 с ускоряющим напряжением 200 кВ.

2. Микроструктура и свойства Al-ФМУНТ после ИПС

Относительные плотности полученных образцов после ИПС приведены в табл. 1. Более резкое падение плотности наблюдается у образцов с исходными МУНТ при увеличении их концентрации, что связано с худшим дости-

жением равномерного распределения и увеличением агломераций трубок на стадии смешивания.

Таблица 1

Относительные плотности образцов после ИПС

	Исходные МУНТ	ФМУНТ
	Относительная плотность, %	
0 масс. % (контр. образец)	98,64 ± 0,01	
0,1 масс. %	98,58 ± 0,02	98,6 ± 0,01
0,25 масс. %	98,26 ± 0,02	98,43 ± 0,02
0,5 масс. %	97,65 ± 0,03	98,3 ± 0,02
1 масс. %	95,79 ± 0,03	97,66 ± 0,03

При СЭМ-исследовании образца алюминия без МУНТ (контрольного образца) обнаруживаются равномерно распределенные поры размером 300–700 нм (рис. 1,а). При анализе микроструктуры контрольного образца на ПЭМ прослеживаются зерна с четкой границей раздела. Размер зерен в большей степени лежит в пределах от 1 до 6 мкм, что соответствует размеру исходных частиц порошка (рис. 1,б). Оксидная пленка претерпевает разрушение в процессе спекания на фрагменты с характерным размером 20–30 нм, которые преимущественно сосредоточены по границам зерен (исходных частиц) алюминия (рис. 1,в).

Исследования структуры образцов после обычного спекания или горячего прессования показывали сохранение оксидной пленки на порошках алюминия [7–9]. Разрушение слоя Al_2O_3 при ИПС ведет к появлению контактных зон алюминия, свободных от оксида (обозначены стрелками) (рис. 1,в). В связи с локальностью анализа наличие пор, наблюдаемое на СЭМ, обнаружено не было.

На рис. 2 показана микроструктура образцов алюминия с добавлением ФМУНТ с концентрацией 0,1, 0,25, 0,5 и 1 масс. %.

С увеличением концентрации нанотрубок эффективность разрушения оксидной пленки снижается, что объясняет увеличение протяженности пустот по границам зерен на СЭМ-изображениях. При максимальной концентрации трубок каждая частица алюминия ограничена «темными» областями толщиной 100–400 нм (рис. 2,з). Ввиду нанометрового размера расположение МУНТ в структуре материала с помощью методов сканирующей микроскопии выявить не удастся. Возможно обнаружить только крупные скопления наноструктур размером более 1 мкм.

На приведенных ПЭМ-изображениях в структуре образцов наблюдается уменьшение количества контактов между частицами порошка (рис. 3), хорошо отражается сохранение сквозных пор, пустот и увеличение их количества с увеличением концентрации нанотрубок.

В структуре исследуемых композитов Al-МУНТ в областях с наноструктурами наблюдаются несколько различных особенностей, представленных на рис. 4, 5.

Преимущественно отдельные МУНТ и их агломерации, как ожидается, встречаются по границам зерен матрицы. С увеличением содержания нано-

трубок контакт с алюминием снижается в связи с сохранением оксидного слоя по границам зерен в представленных областях. Исходя из этого в образцах с содержанием МУНТ 0,25 масс. % и более между зернами алюминия и боковой поверхностью наноструктур прослеживаются характерные несплошности и пустоты (шириной от 10 до 50 нм), связанные с отсутствием взаимодействия компонентов композита (стрелки на рис. 4).

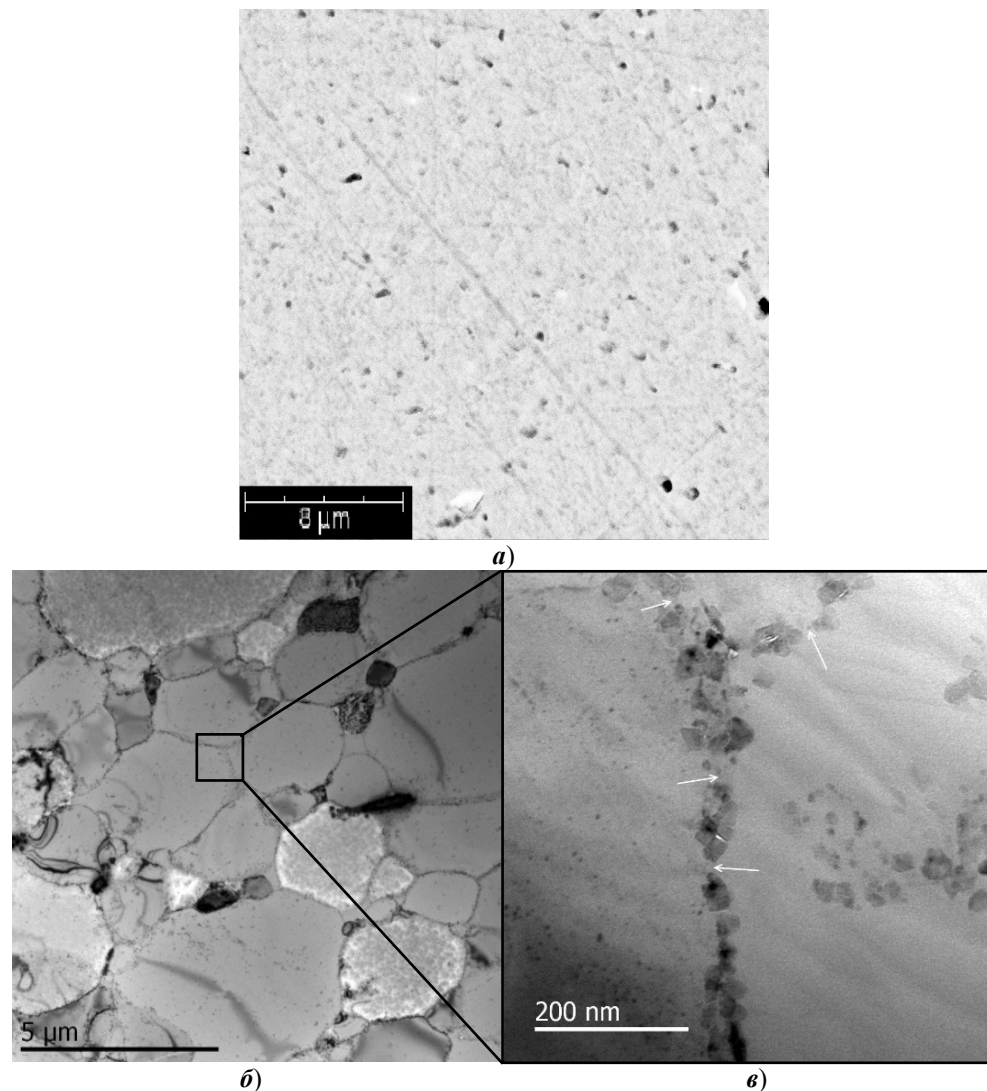


Рис. 1. СЭМ (а) и ПЭМ (б, в) изображения Al без МУНТ (контрольный образец) после ИПС при 600 °С, $t_{\text{сп}} = 20$ мин

Образцы с 0,1 масс.% ФМУНТ обоих типов имеют наибольшее количество контактных областей. Ширина пустот также невелика (не более 3–5 нм, стрелка на рис. 5), по сравнению с образцами, где содержание нанотрубок составляет 0,25 масс.% и более.

Несмотря на твердотельный характер спекания (600 °С), часть трубок обнаруживается внутри алюминиевых зерен, что может быть объяснено

плавлением матрицы. Авторы других работ подтверждают возможность образования жидкой фазы металла в процессе ИПС [10–12].

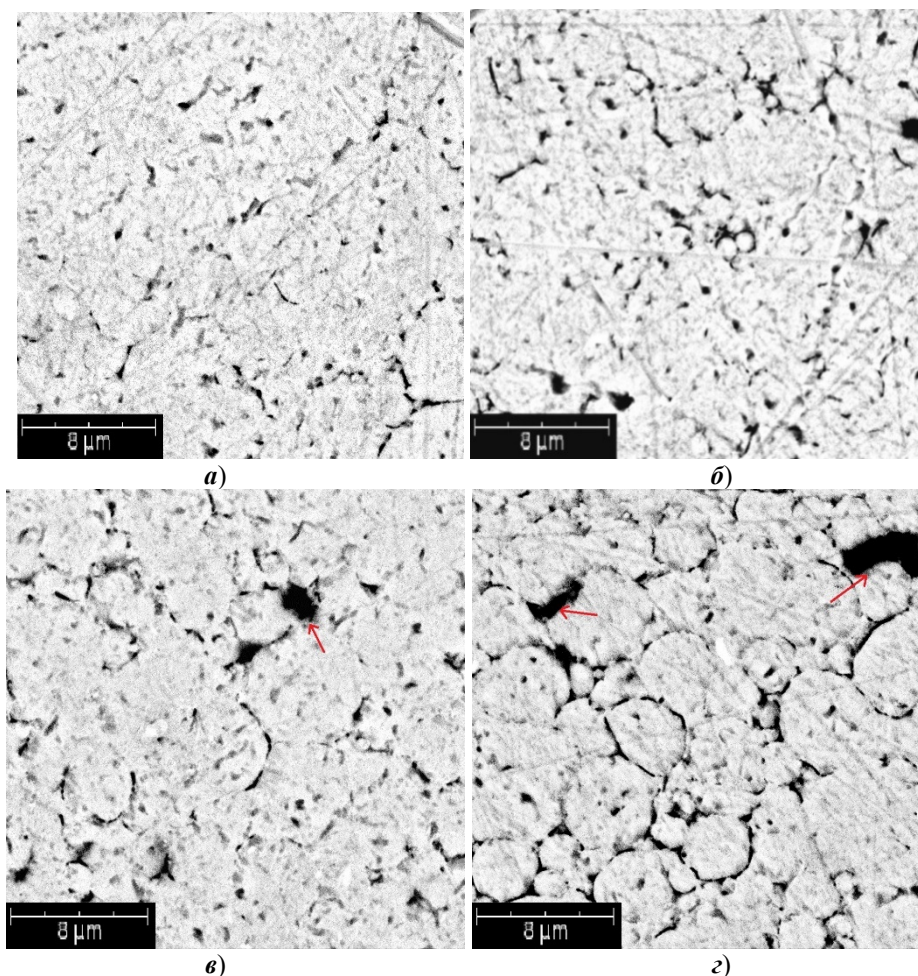


Рис. 2. СЭМ-изображения микроструктуры таблеток после ИПС при 600 °С, $t_{\text{сп}} = 20$ мин: *а* – Al-0,1 масс.% ФМУНТ; *б* – Al-0,25 масс.% ФМУНТ; *в* – Al-0,5 масс.% ФМУНТ; *з* – Al-1 масс.% ФМУНТ

По представленным ПЭМ-изображениям оба типа ФМУНТ, обнаруженные внутри зерен матрицы, вне зависимости от морфологии, сохраняют свою структуру (рис. 6). Наличие полярных групп на поверхности наноструктур, по всей видимости, приводит к ограничению протекания химической реакции образования Al_4C_3 [11].

Деструкцию с образованием карбида претерпевают исходные нанотрубки, что подтверждается рефlekсами на электронограммах и результатами комбинационного рассеяния света. Обнаруженные фрагменты частиц карбидной фазы внутри зерен матрицы полностью повторяют морфологию вводимых МУНТ (рис. 7). Толщина большей части карбидных частиц лежит в пределах 100–140 нм. Нанотрубки, оказавшиеся внутри зерен, меньше представленного размера, не претерпевают разрушению за счет более совершенной структуры (рис. 7, *а*).

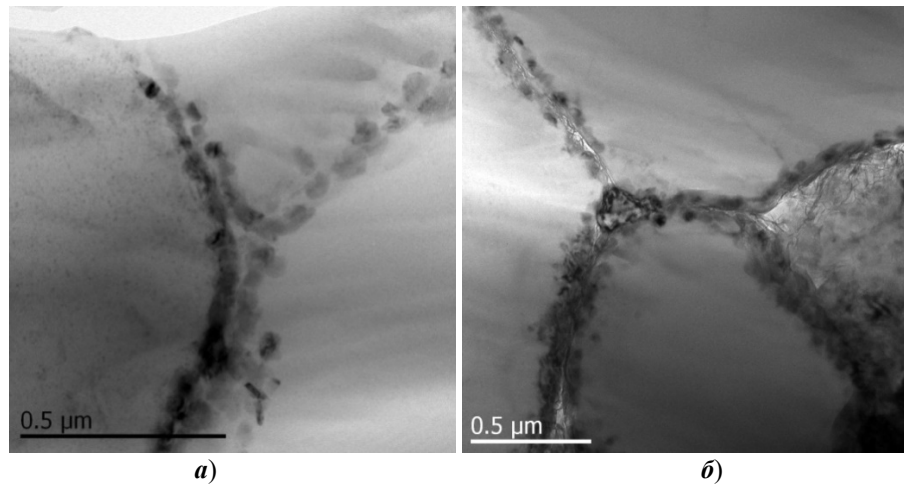


Рис. 3. ПЭМ-изображения микроструктур композитов:
a – Al-0,1 масс.% ФМУНТ; *б* – Al-0,5 масс.% ФМУНТ

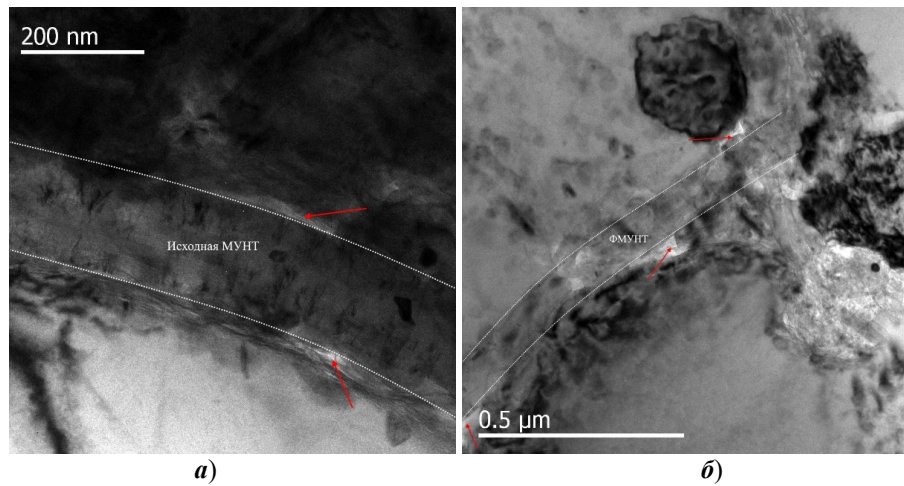


Рис. 4. ПЭМ-изображение микроструктуры композитов:
a – Al-0,25 масс.% исходные МУНТ; *б* – Al-0,5 масс.% ФМУНТ

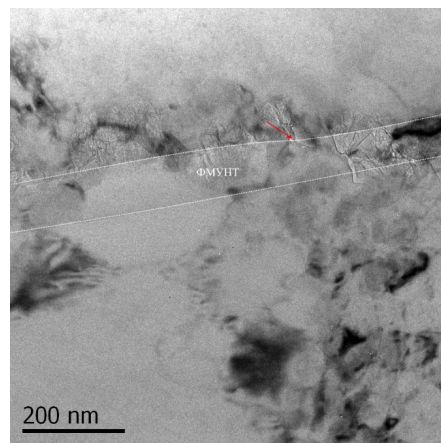


Рис. 5. ПЭМ-изображение микроструктуры композита Al-0,1 масс.% ФМУНТ

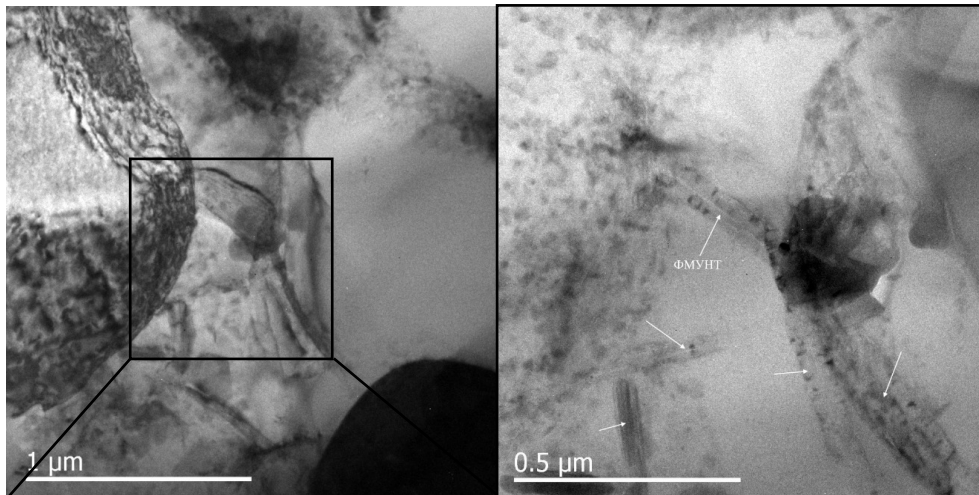
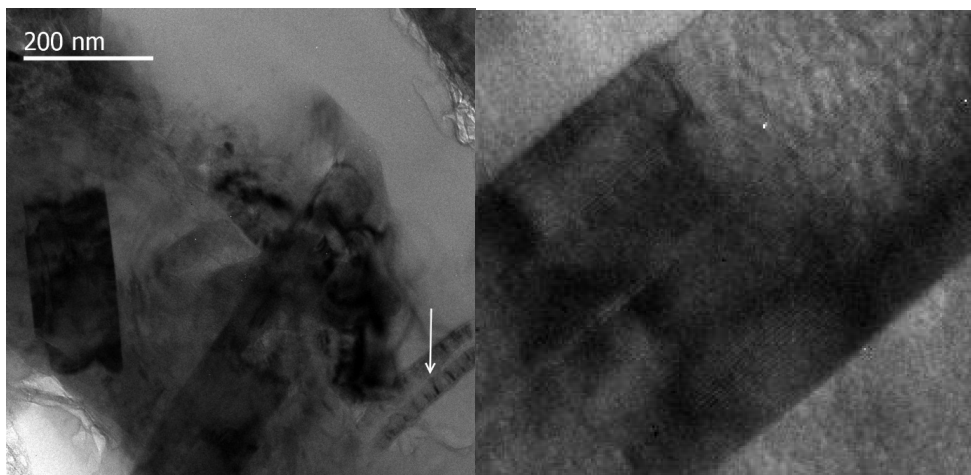


Рис. 6. ПЭМ-изображения ФМУНТ внутри зерна матрицы

Рис. 7. ПЭМ-изображения морфологии карбидов: *a* – общий вид (стрелкой обозначена исходная МУНТ, не подвергшаяся деструкции); *б* – увеличенное изображение Al_4C_3

Заключение

В результате применения ИПС за достаточно короткое время достигнута высокая плотность материалов, в отличие от традиционных методов спекания. Относительная плотность композитов составила около 98 % при температуре спекания в 600 °С с временем выдержки 20 мин и давлении 50 МПа. Показано, что ИПС позволяет добиться разрушения слоя Al_2O_3 на частицах порошка металла. Также установлено, что добавление и увеличение содержания МУНТ в матрицу снижает эффективность разрушения данного слоя.

Установлено, что размер зерна матрицы (~3 мкм) сохраняется на уровне размера исходных частиц порошка металла за счет наличия Al_2O_3 по границам зерен и короткого времени выдержки при ИПС.

Установлено, что МУНТ в структуре материала после спекания располагаются как по границам зерен матрицы, так и внутри зерен. В зависимости от расположения и концентрации МУНТ наблюдается различная степень вза-

имодействия с материалом матрицы. Обнаружено, что ФМУНТ сохраняют свою структуру, тогда как некоторая часть исходных МУНТ претерпевает де-струкцию и образует Al_4C_3 .

Библиографический список

1. **Булярский, С. В.** Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение / С. В. Булярский. – Ульяновск : Стрежень, 2011. – 478 с.
2. **Agarwal, A.** Carbon nanotubes – reinforced metal matrix composites / A. Agarwal, S. R. Bakshi, D. Lahiri. – CRC Press, 2010. – 325 p.
3. **Григорьев, Е. Г.** Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков / Е. Г. Григорьев, Б. А. Калинин. – Москва : МИФИ, 2008. – 152 с.
4. 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.
5. 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. Ницев, А. А. Панов, А. А. Пыненков // Башкирский химический журнал. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 109–113.
6. 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 10.21685/2072-30402016-2-11.
7. Aluminum matrix composites reinforced with multi-walled boron nitride nanotubes fabricated by a high-pressure torsion technique / Y. Xue [et al.] // Materials and Design. – 2015. – Vol. 88. – P. 451–460.
8. Frequency effect on pulse electric current sintering process of pure aluminium powder / G. Xier [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 359. – P. 384–390.
9. **Omori, M.** Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS) / M. Omori // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Vol. 287. – P. 183–188. – ISSN: 0921-5093.
10. **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. – P. 431–444.
11. **Cavaliere, P.** Carbonnanotube reinforced aluminum matrix composites produced by spark plasma sintering / P. Cavaliere, B. Sadeghi, A. Shabani // Journal of Materials Science. – 2017. – Vol. 52, № 14. – P. 8618–8629.
12. **Nagae, T.** Compaction and application of the aluminum powder by spark plasma sintering process / T. Nagae, S. Tomiya, N. Yokota // Toyama Industrial Technology Center. – 2001. – Vol. 89. – P. 89–93.

References

1. Bulyarskiy S. V. *Uglerodnye nanotrubki: tekhnologiya, upravlenie svoystvami, primeneniye* [Carbon nanotubes: technology, property management, application]. Ulyanovsk: Strezhen', 2011, 478 p. [In Russian]
2. Agarwal A., Bakshi S. R., Lahiri D. *Carbon nanotubes – reinforced metal matrix composites*. CRC Press, 2010, 325 p.
3. Grigor'ev E. G., Kalin B. A. *Elektroimpul'snaya tekhnologiya formirovaniya materialov iz poroshkov* [Electropulse technology for the formation of materials made of powders]. Moscow: MIFI, 2008, 152 p. [In Russian]

4. 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.
5. 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. [In Russian]
6. Bunakov N. A., Kozlov D. V., Golovanov V. N., Klimov E. S., Efimov M. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2016, no. 2 (38), pp. 134–146. DOI 10.21685/2072-30402016-2-11. [In Russian]
7. Xue Y. et al. *Materials and Design*. 2015, vol. 88, pp. 451–460.
8. Xier G. et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, vol. 359, pp. 384–390.
9. Omori M. *Materials Science and Engineering: A*. 2000, vol. 287, pp. 183–188. ISSN: 0921-5093.
10. Kwon H., Kawasaki A. *Advances in Composite Materials for Medicine and Nanotechnology*. 2011, pp. 431–444.
11. Cavaliere P., Sadeghi B., Shabani A. *Journal of Materials Science*. 2017, vol. 52, no. 14, pp. 8618–8629.
12. Nagae T., Tomiya S., Yokota N. *Toyama Industrial Technology Center*. 2001, vol. 89, pp. 89–93.

Бунаков Никита Андреевич

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

Research engineer, Research Technological Institute named after S. P. Kapitsa, Ulyanovsk State University (42, L'va 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

Kozlov Dmitriy Vladimirovich

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

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

Golovanov Viktor Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the sub-department of material physics, vice-rector for research and information technology, Ulyanovsk State University (42, L'va Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

Ефимов Михаил Сергеевич

бакалавр, младший научный сотрудник,
Научно-исследовательский
технологический институт имени
С. П. Капицы, Ульяновский
государственный университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Льва Толстого 42)

E-mail: efimovmix@mail.ru

Efimov Mikhail Sergeevich

Bachelor, junior researcher, Research
Technological Institute named after
S. P. Kapitsa, Ulyanovsk State University
(42, L'va Tolstogo street, Ulyanovsk,
Russia)

Белобров Иван Сергеевич

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

E-mail: suik73@mail.ru

Belobrov Ivan Sergeevich

Research engineer, Research Technological
Institute named after S. P. Kapitsa,
Ulyanovsk State University
(42, L'va Tolstogo street, Ulyanovsk,
Russia)

Адамович Артем Александрович

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

E-mail: artem.adamovich@bk.ru

Adamovich Artem Aleksandrovich

Research assistant, Research
Technological Institute named after
S. P. Kapitsa, Ulyanovsk State University
(42, L'va Tolstogo street, Ulyanovsk,
Russia)

Сугак Дмитрий Евгеньевич

главный технолог, ООО «Промышленная
экология» (Россия, г. Ульяновск,
просп. Нариманова, 1, корп. 3)

E-mail: demonsugak@mail.ru

Sugak Dmitriy Evgen'evich

Chief technologist, LLC «Promyshlennaya
ekologiya» (3 building, 1 Narimanova
avenue, Ulyanovsk, Russia)

Образец цитирования:

Микроструктурные особенности композиционного материала «алюминий – многостенные углеродные нанотрубки» после искро-плазменного спекания / Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов, В. Н. Голованов, М. С. Ефимов, И. С. Белобров, А. А. Адамович, Д. Е. Сугак // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2019. – № 3 (51). – С. 120–130. – DOI 10.21685/2072-3040-2019-3-8.