



DOI: 10.18721/JEST.25115
УДК 539.216

*А.А. Возняковский¹, Т.С. Кольцова², С.В. Кидалов¹,
О.В. Толочко², А.П. Возняковский³, А.Л. Кумсков⁴*

1 – Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

2 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

3 – Научно-исследовательский институт синтетического каучука, Санкт-Петербург, Россия

4 – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

СИНТЕЗ ПОРОШКОВОГО ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА СОСТАВА ДНА-МУНТ И ЕГО УСТОЙЧИВЫХ ВОДНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

По всему миру активно синтезируют и исследуют гибридные углеродные наноматериалы на базе углеродных нанотрубок (УНТ) и детонационных наноалмазов (ДНА). Мотивацией служит желание совместить в гибридном материале лучшие свойства ДНА и УНТ. Имея принципиально новые свойства, гибридные материалы могут применяться в различных областях промышленности – от микроэлектроники и биотехнологии до материаловедения. Однако большинство синтезированных на данный момент гибридных материалов состава ДНА-УНТ представляют собой пленки, что не позволяет использовать их во множестве перспективных применений, например в качестве наполнителей при создании композиционных материалов. В предлагаемой работе показана возможность синтеза гомогенного гибридного материала состава ДНА-УНТ в виде порошка, причем УНТ выращены на поверхности ДНА с помощью CVD метода (химическое осаждение из газовой фазы). Массовая доля УНТ составила 32 масс. %. Было установлено: УНТ равномерно покрывают поверхность агломератов ДНА, что оказывает сильное влияние на свойства гибридного материала. Также была получена устойчивая обратимая водная суспензия гибридного материала со средним размером частиц 50–60 нм. Разработанная методика синтеза гибридного материала состава ДНА–УНТ позволит расширить области применения таких материалов, а также экспериментально оценить их эффективность.

Ключевые слова: гибридный материал, детонационные наноалмазы, углеродные нанотрубки, порошок, наножидкости.

Ссылка при цитировании:

А.А. Возняковский, Т.С. Кольцова, С.В. Кидалов, О.В. Толочко, А.П. Возняковский, А.Л. Кумсков. Синтез порошкового гибридного материала состава ДНА-МУНТ и его устойчивых водных наножидкостей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 155–162. DOI: 10.18721/JEST.25115.

*A.A. Vozniakovskii¹, T.S. Koltsova², S.V. Kidalov¹,
O.V. Tolochko², A.P. Voznyakovskii³, A.L. Kumskov⁴*

1 – Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

2 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

3 – Institute of synthetic rubber, St. Petersburg, Russia

4 – National research center «Kurchatov institute», Moscow, Russia

SYNTHESIS OF HYBRID POWDER NANOMATERIAL CONSISTING OF DETONATION NANODIAMONDS/CARBON NANOTUBES AND ITS STABLE REVERSIBLE WATER NANOFUIDS

Researchers around the world are actively synthesizing and exploring hybrid carbon nanomaterials based on carbon nanotubes (CNT) and detonation nanodiamonds (DND). The motivation for study of such materials is the desire to combine the best properties of DND and CNT in a hybrid material. Modern industry

can use hybrid materials in various areas of modern industry: from microelectronics and biomedicine to additives in composite materials. However, most of the currently synthesized hybrid materials of the DND–CNT composition are films, which makes it impossible to use them in many promising applications, for example, as additives in composite materials. This work shows the possibility of synthesizing a homogeneous hybrid material of the DNA–CNT composition in the form of powder by growing the CNT on the surface of the DNA using the CVD (chemical vapor deposition) method. Mass fraction of CNT was 32 wt. %. It was found that CNTs evenly cover the surface of DND agglomerates. A stable, reversible, aqueous suspension of a hybrid material with an average particle size of 50–60 nm was also obtained. The method of synthesis of the hybrid material with the DND–CNT composition, which we proposed in this work, will make it possible to expand the possible applications of such materials, as well as experimentally evaluate their effectiveness.

Keywords: hybrid materials, detonation nanodiamonds, carbon nanotubes, powder, nanofluids.

Citation:

A.A. Vozniakovskii, T.S. Koltsova, S.V. Kidalov, O.V. Tolochko, A.P. Voznyakovskii, A.L. Kumskov, Synthesis of hybrid powder nanomaterial consisting of detonation nanodiamonds/carbon nanotubes and its stable reversible water nanofluids, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 155–162, DOI: 10.18721/JEST.25115.

Введение

Развитие современной промышленности постоянно требует создания новых материалов со все более высокими характеристиками. Одним из наиболее перспективных направлений в решении этой задачи является создание композиционных материалов (КМ) [1]. Сочетая в КМ свойства исходной матрицы и модифицирующей добавки (наполнитель), можно получить новый материал с важными эксплуатационными свойствами. При создании КМ в качестве наполнителей активно используются углеродные наноматериалы, такие, как детонационные наноалмазы (ДНА) [2–4] и углеродные нанотрубки (УНТ) [5, 6].

Не менее перспективны в качестве наполнителей в КМ так называемые гибридные углеродные материалы, состоящие из двух или более видов наноуглеродов. Такие материалы могут демонстрировать синергетические свойства, что открывает новые перспективы использования КМ. Для синтеза гибридных материалов активно применяют методы PECVD (плазменно-химическое осаждение из газовой фазы) [7] и HFCVD (газофазное химическое осаждение с активацией горячей нитью) [8, 9], которые позволяют получать однородные гибридные материалы состава ДНА-УНТ. Одна-

ко синтезированные этими методами в указанных работах гибридные материалы представляют собой пленочные структуры, что делает невозможным их использование в качестве наполнителя при создании КМ в форме порошка или взвесей/суспензий.

В связи с этим для применения гибридных материалов ДНА-УНТ как в научных, так и в промышленных целях необходимо разработать методику синтеза, которая позволит получать большие объёмы материала в виде порошка, обеспечивая при этом его высокую гомогенность, что и является целью данной работы.

Методика синтеза

Для синтеза гибридного материала состава ДНА-УНТ мы использовали CVD метод по аналогии с работой [10], где на поверхности частиц алюминия, покрытых никелевым катализатором, были выращены углеродные нановолокна.

В качестве исходного материала были взяты ДНА марки «ТАН» производства СКТБ «Технолог» (Санкт-Петербург, Россия). На первой стадии на поверхность ДНА из водной фазы осаждался нитрат кобальта ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$) и сушился в сушильном шкафу при температуре 100 °С. На второй стадии ДНА с осажженным нитратом кобальта отжигался при температуре

400 °С в течение 1 часа, добиваясь разложения нитрата кобальта до оксида кобальта (CoO). На третьей стадии порошок ДНА отжигался в атмосфере водорода (H₂) в течение 2 часов при температуре 750 °С с целью восстановления оксида кобальта до чистого кобальта (Co). Концентрация кобальта составила 0,02 масс. %. На последней стадии на поверхностях ДНА, покрытых кобальтом, который выступал в качестве металла-катализатора, выращивались УНТ методом CVD. В качестве источника углерода использовался ацетилен. Концентрация УНТ в гибридном материале составила 32 масс. %.

Методы исследования

Исследование структуры образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Supra55VP-3259 (Zeiss, Германия) и просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) Osiris (FEI, США). Рентгеноструктурные исследования проводились на приборе XRD-7000 (Shimadzu, Япония) CuK α ($\lambda = 0,154051$ нм). Рамановские исследования проводились на приборе Horiba Yobin Yvon LabRam HR 800 (лазер 532 нм) (HORIBA Scientific, Япония). Измерение размера частиц

проводили методом динамического рассеяния света (DLS) на приборе ZetaSizer Nano ZS Malvern (США) и методом лазерной дифракции на приборе MasterSizer 2000 (США). Измерение электропроводности и дзета-потенциала проводили методом DLS на приборе ZetaSizer Nano ZS Malvern (США).

Результаты и обсуждение

Синтезированный материал представлял собой высокодисперсный порошок черного цвета. Несмотря на то, что в виде порошка ДНА представляют собой крупные пористые агрегаты размером до нескольких десятков микрон, методика нанесения металла-катализатора через водную фазу позволила нам осаждать катализатор на всю поверхность устойчивых агломератов ДНА со средним размером 10–100 нм, из которых и состоят агрегаты. Равномерность же распределения УНТ по поверхности агломератов ДНА зависит от однородности распределения металла-катализатора по поверхности частиц исходного порошка, как показано в [11].

На рис. 1 представлены микрофотографии синтезированного гибридного материала.

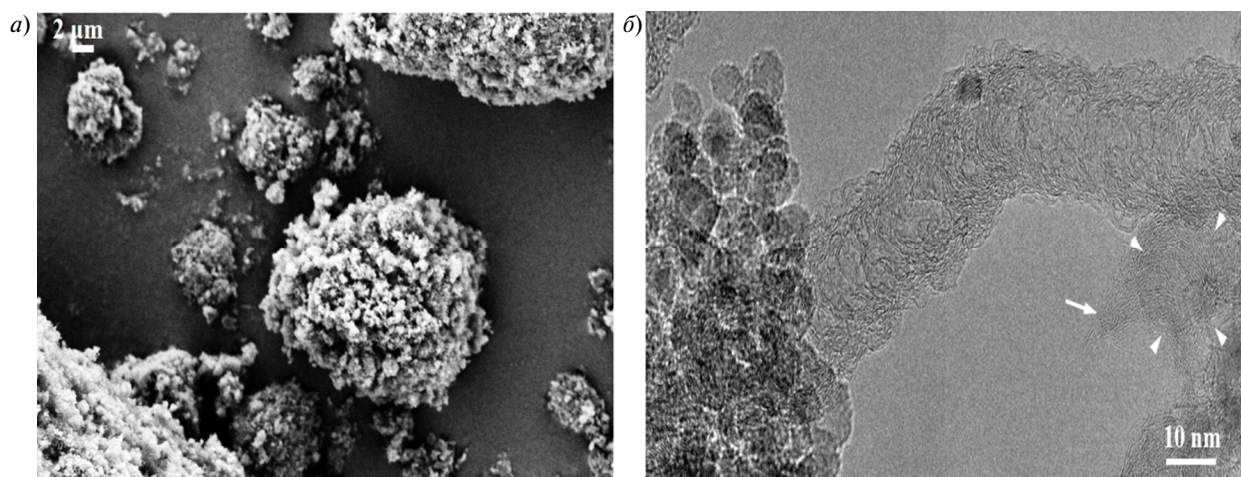


Рис. 1. Изображения гибридного материала состава ДНА-УНТ: *a* – СЭМ изображение гибридного материала; линейная шкала равна 2 мкм; *б* – ПЭМ изображение гибридного материала; линейная шкала равна 10 нм

Fig. 1. Images of the hybrid material of the composition of the DNA-CNT: *a* – SEM image of the hybrid material; linear scale equal to 2 microns; *b* – TEM image of the hybrid material, the linear scale is 10 nm

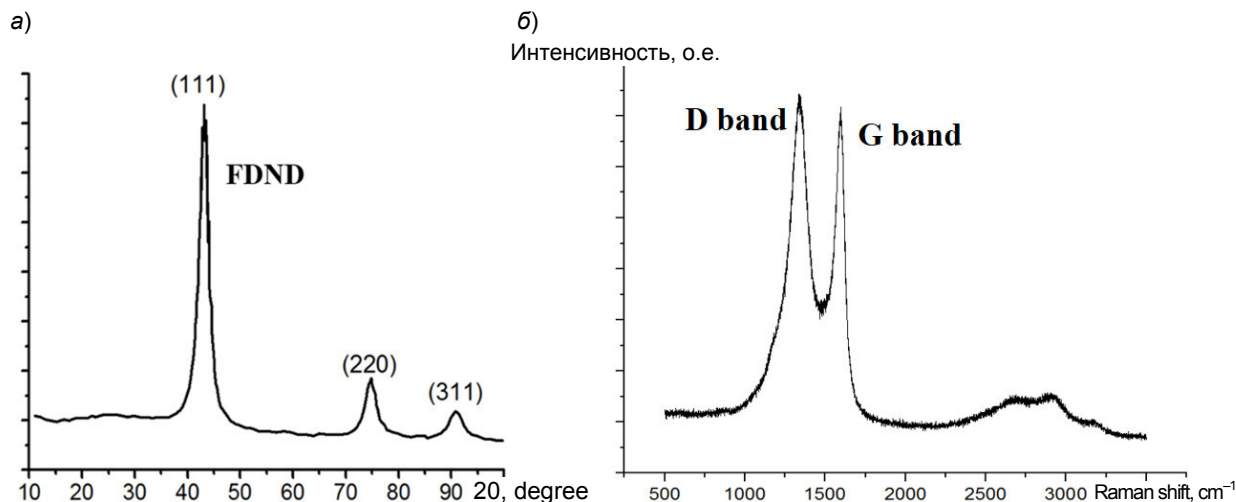


Рис. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа (а) и спектроскопии комбинационного анализа (б) FDND
 Fig. 2. Results of X-ray (a) and Raman (b) studies of FDND

На рис. 1, а представлено СЭМ изображение гибридного материала. Видно, что УНТ равномерно покрывают агломераты ДНА, обеспечивая высокую гомогенность гибридного материала. В виде порошка эти агломераты агрегируют и образуют частицы размером около 10 мкм. На рис. 1, б представлено ПЭМ изображение гибридного материала. Виден агломерат ДНА, состоящий из частиц ДНА размером 4–8 нм, к поверхности которого прикреплена бамбуковидная многостенная УНТ. Подобные многостенные УНТ наблюдались в исследовании [12]. Также на рис. 1, б белыми стрелками обозначена УНТ, ось которой направлена параллельно электронному лучу, что позволяет увидеть плоскости графита в виде концентрических окружностей. Таким образом, рис. 1 показывает, что УНТ полностью покрывают поверхность ДНА. В дальнейшем полученный гибридный материал будет обозначаться как FDND.

Измерение удельной площади поверхности по методу БЭТ показало, что у исследуемого образца она составляет 225 м²/г. Полученное значение хорошо согласуется с относительно небольшим значением удельной поверхности, характерным для многостенных УНТ. В [13], например, было исследовано 10 образцов мно-

гостенных УНТ и показано, что у большинства из них удельная площадь поверхности не превышает 200 м²/г. Такие низкие значения удельной поверхности многостенных УНТ обусловлены сильной зависимостью этого показателя от количества слоев УНТ. В работе [14] показано, что УНТ, состоящие из 15 и более слоев, имеют удельную поверхность менее 150 м²/г.

Объем пор в образце FDND в зависимости от их размера оказался следующим:

Тип пор (размер пор)	Объем в порах, см ³ /г
Микропоры (менее 2 нм).....	0,01393
Мезопоры (2–50 нм).....	0,44737
Макропоры (более 50 нм).....	0,20358
Итого.....	0,66488

Гибридный материал был исследован методами рентгеноструктурного анализа (X-RAY) и спектроскопии комбинационного анализа (Raman).

На рис. 2, а четко видны три пика, соответствующих алмазу, что свидетельствует о наличии ДНА в гибридном материале. Для оценки качества синтезированных многостенных УНТ были проведены рамановские исследования образцов FDND. На рис. 2, б представлен типичный рамановский спектр полученных образцов. Он аналогичен спектрам наблюдаемых в [15] многостенных УНТ. Соотношение

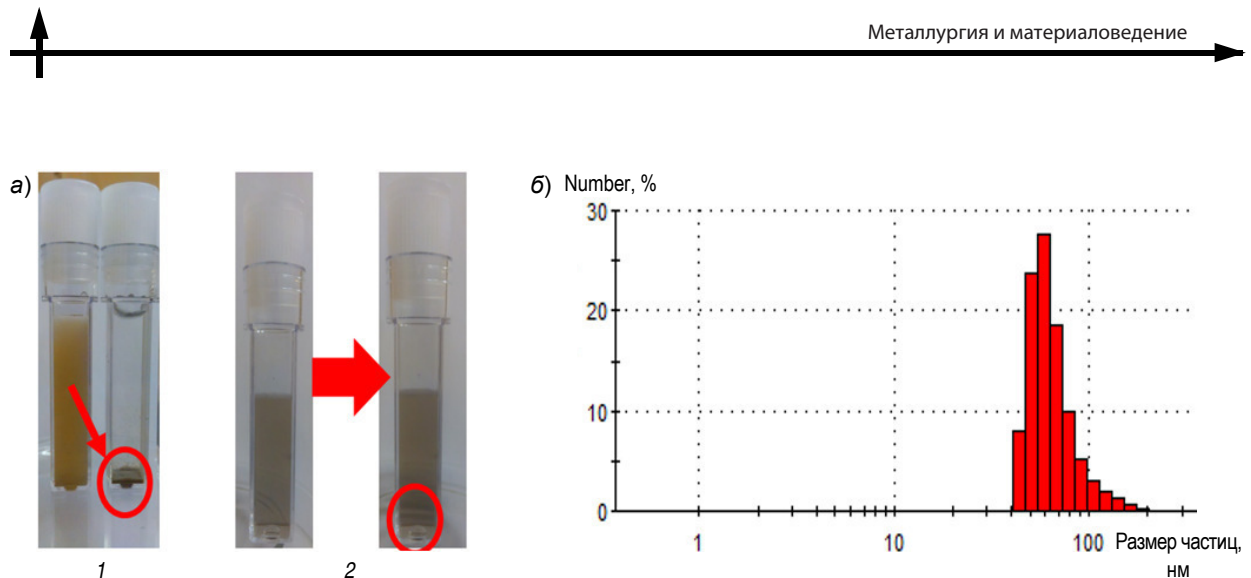


Рис. 3. Водные суспензии FDND: *a* – результаты исследования устойчивости суспензии исходного ДНА (1) и FDND (2) сразу после УЗ обработки и после 72 часов отстаивания; *б* – результаты исследования размеров частиц водной суспензии FDND

Fig. 3. Water suspensions of FDND: *a* – results of a study of the stability of the suspension of the initial DND (1) and FDND (2) immediately after the ultrasonic treatment and after 72 hours of settling; *б* – the results of the study of the particle size of an water suspension of FDND

пиков D и G составляет примерно 1:1. В работе [16] было показано, что подобное соотношение интенсивностей типично для многостенных УНТ, выращенных методами CVD и CCVD, и свидетельствует о большом количестве структурных дефектов в таких многостенных УНТ.

Из полученного порошка была приготовлена водная суспензия путем ультразвукового (УЗ) облучения. Концентрация FDND в суспензии составила 1 масс. %. На рис. 3 представлены результаты исследования устойчивости водной суспензии FDND и определение размера частиц методом DLS.

Из рис. 3, *a*, 2 видно, что, в отличие от исходного ДНА (рис. 3, *a* 1), порошок FDND образует устойчивую водную суспензию. При этом признаки выпадения осадка в водной суспензии ДНА не наблюдались даже после отстаивания в течение 20 дней. Этот факт является неожиданным, учитывая гидрофобный характер УНТ. Такая устойчивость может быть объяснена тем, что во время технологического цикла восстановления оксида кобальта до чистого кобальта в атмосфере водо-

рода происходит гидрирование поверхности ДНА, за счет чего гибридный материал становится стабильным в воде даже после синтеза гидрофобных многостенных УНТ на поверхности ДНА. Возможность стабилизации суспензий ДНА путем гидрирования его поверхности была показана в [17]. Отсутствие осадка в нашем случае доказывает, что многостенные УНТ прочно связаны с поверхностью ДНА и не отрываются под воздействием УЗ облучения.

Установлено также, что после сушки суспензии FDND до порошка возможно обратно получать устойчивую водную суспензию FDND путем легкой УЗ обработки. При воздействии УЗ облучения агрегаты FDND микронных размеров, имеющиеся в сухом порошке (см. рис. 1), дезагрегируют до устойчивых в воде частиц размером 50–60 нм, что показано на рис. 3, *б*.

Заключение

Разработана методика синтеза гибридного материала состава ДНА-УНТ, основанная на выращивании УНТ на поверхности агломера-

тов ДНА методом CVD. Данная методика позволяет синтезировать гомогенный гибридный материал в виде порошка, а также в виде стабильной обратимой водной суспензии. Благодаря масштабируемости предложенного метода получения гибридного материала, открывается реальная возможность исследования влияния

гибридного материала на свойства КМ и внедрения их в промышленность.

Работа выполнена в рамках государственных тематических исследований ФТИ им. А. Ф. Иоффе по теме № 0040-2014-0013 «Физико-химические основы технологии новых функциональных материалов на основе углеродных наноструктур».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
2. Mochalin V.N., Gogotsi Y. Nanodiamond-polymer composites // *Diamond Relat. Mater.* 2015. Vol. 58. P. 161–171.
3. Woo D.J., Heer F.C., Brewer L.N., Hooper J.P., Osswald S. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal matrix composites using cold-spray deposition // *Carbon*. 2015. Vol. 86. P. 15–25.
4. Livramento V., Correia J.B., Shohoji N., Osawa E. Nanodiamond as an effective reinforcing component for nano-copper // *Diamond Relat. Mater.* 2007. Vol. 16(2). P. 202–204.
5. Moghadam D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review // *Composites Part B*. 2015. Vol. 77. P. 402–420.
6. Mittal G., Dhand V., Rhee K.Y., Park S.J., Lee W.R. A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites // *Ind. Eng. Chem.* 2015. Vol. 21. P. 11–25.
7. Xiao X., Elam J.W., Trasobares S., Auciello O., Carlisle J.A. Synthesis of a Self-Assembled Hybrid of Ultrananocrystalline Diamond and Carbon Nanotubes // *Adv. Mater.* 2005. Vol. 17(12). P. 1496–1500.
8. Yang Q., Xiao C., Chen W., Hirose A. Selective growth of diamond and carbon nanostructures by hot filament chemical vapor deposition // *Diamond Relat. Mater.* 2004. Vol. 13(3). P. 433–437.
9. Shankar N., Glumac N.G., Yu M.F., Vanka S.P. Growth of nanodiamond/carbon-nanotube composites with hot filament chemical vapor deposition // *Diamond Relat. Mater.* 2008. Vol. 17(1). P. 79–83.
10. Kol'tsova T.S., Shakhov F.M., Voznyakovskii A.A., Lyashkov A.I., Tolochko O.V., Nasibulin A.G., Mikhailov V.G. Fabrication of a compacted aluminum-carbon nanofiber material by hot pressing // *Tech. Phys.* 2014. Vol. 59(11). P. 1626–1630.
11. He C.N., Zhao N.Q., Shi C.S., Song S.Z. Mechanical properties and microstructures of carbon nanotube-reinforced Al matrix composite fabricated by in situ chemical vapor deposition // *J. Alloys Comp.* 2009. Vol. 487. P. 258–262.
12. Baaziz W., Melinte G., Ersen O., Pham-Huu C., Janowska I. Effect of nitriding/nanostructuring of few layer graphene supported iron-based particles; catalyst in graphene etching and carbon nanofilament growth // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. Vol. 59(16). P. 15988–15993.
13. Poulsen S.S., Jackson P., Kling K., Knudsen K.B., Skaug V., Kyjovska Z.O., Thomsena B.L., Clausena P.A., Atluria R., Berthinga T., Bengtsona S., Wolffe H., Jensen K.A., Wallinad H., Vogel U. Multi-walled carbon nanotube physicochemical properties predict pulmonary inflammation and genotoxicity // *Nanotoxicology*. 2016. Vol. 10(9). P. 1263–1275.
14. Bokobza L., Zhang J. Raman spectroscopic characterization of multiwall carbon nanotubes and of composites // *eXPRESS Polym. Lett.* 2012. Vol. 6 (7). P. 601–608.
15. Ivanova M.V., Lamprecht C., Loureiro M.J., Huzil J.T., Foldvari M. Pharmaceutical characterization of solid and dispersed carbon nanotubes as nanoexcipients // *Int. J. Nanomed.* 2012. No 7. P. 403–415.
16. Neverovskaya Y., Voznyakovskii A.P., Dolmatov V.Y. Structure of the dispersive medium and sedimentation resistance of suspensions of detonation nanodiamonds // *Phys. Solid State*. 2004. Vol. 46(4). P. 662–664.
17. Williams O.A., Hees J., Dieker C., Jäger W., Kirste L., Nebel C.E. Size-Dependent Reactivity of Diamond Nanoparticles // *ACS nano*. 2010. Vol. 4(8). P. 4824–4830.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЗНЯКОВСКИЙ Алексей Александрович – младший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе

E-mail: alexey_inform@mail.ru

КОЛЬЦОВА Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: annelet@yandex.ru

КИДАЛОВ Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе

E-mail: kidalov@mail.ioffe.ru

ТОЛОЧКО Олег В. – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: ol_tol@hotmail.com

ВОЗНЯКОВСКИЙ Александр Петрович – доктор химических наук заведующий сектором Научно-исследовательского института синтетического каучука

E-mail: voznap@mail.ru

КУМСКОВ Александр Леонидович – старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

E-mail: faneva@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 16.01.2019

REFERENCES

- [1] Rudskoy A.I., Volkov K.N., Kondratiev S.Yu., Sokolov Yu.A. Physical processes and technologies for obtaining metal powders from the melt. SPb.: Polytechnic Publishing House. University, 2018. 610 s. (rus.)
- [2] Mochalin V.N., Gogotsi Y. Nanodiamond–polymer composites. *Diamond Relat. Mater.* 2015. Vol. 58. P. 161–171.
- [3] Woo D.J., Heer F.C., Brewer L.N., Hooper J.P., Osswald S. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal matrix composites using cold-spray deposition. *Carbon*. 2015. Vol. 86. P. 15–25.
- [4] Livramento V., Correia J.B., Shohoji N., Osawa E. Nanodiamond as an effective reinforcing component for nano-copper. *Diamond Relat. Mater.* 2007. Vol. 16(2). P. 202–204.
- [5] Moghadam D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review. *Composites Part B*. 2015. Vol. 77. P. 402–420.
- [6] Mittal G., Dhand V., Rhee K.Y., Park S.J., Lee W.R. A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites. *Ind. Eng. Chem.* 2015. Vol. 21. P. 11–25.
- [7] Xiao X., Elam J.W., Trasobares S., Auciello O., Carlisle J.A. Synthesis of a Self-Assembled Hybrid of Ultrananocrystalline Diamond and Carbon Nanotubes. *Adv. Mater.* 2005. Vol. 17(12). P. 1496–1500.
- [8] Yang Q., Xiao C., Chen W., Hirose A. Selective growth of diamond and carbon nanostructures by hot filament chemical vapor deposition. *Diamond Relat. Mater.* 2004. Vol. 13(3). P. 433–437.
- [9] Shankar N., Glumac N.G., Yu M.F., Vanka S.P. Growth of nanodiamond/carbon-nanotube composites with hot filament chemical vapor deposition. *Diamond Relat. Mater.* 2008. Vol. 17(1). P. 79–83.
- [10] Kol'tsova T.S., Shakhov F.M., Voznyakovskii A.A., Lyashkov A.I., Tolochko O.V., Nasibulin A.G., Mikhailov V.G. Fabrication of a compacted aluminum-carbon nanofiber material by hot pressing. *Tech. Phys.* 2014. Vol. 59(11). P. 1626–1630.
- [11] He C.N., Zhao N.Q., Shi C.S., Song S.Z. Mechanical properties and microstructures of carbon nanotube-reinforced Al matrix composite fabricated by in situ chemical vapor deposition. *J. Alloys Comp.* 2009. Vol. 487. P. 258–262.
- [12] Baaziz W., Melinte G., Ersen O., Pham-Huu C., Janowska I. Effect of nitriding/nanostructuring of few

layer graphene supported iron-based particles; catalyst in graphene etching and carbon nanofilament growth. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. Vol. 59(16). P. 15988–15993.

[13] **Poulsen S.S., Jackson P., Kling K., Knudsen K.B., Skaug V., Kyjovska Z.O., Thomsena B.L., Clausena P.A., Atluria R., Berthinga T., Bengtsona S., Wolffc H., Jensena K.A., Wallinad H., Vogel U.** Multi-walled carbon nanotube physicochemical properties predict pulmonary inflammation and genotoxicity. *Nanotoxicology.* 2016. Vol. 10(9). P. 1263–1275.

[14] **Bokobza L., Zhang J.** Raman spectroscopic characterization of multiwall carbon nanotubes and of composites. *eXPRESS Polym. Lett.* 2012. Vol. 6 (7). P. 601–608.

[15] **Ivanova M.V., Lamprecht C., Loureiro M.J., Huzil J.T., Foldvari M.** Pharmaceutical characterization of solid and dispersed carbon nanotubes as nanoexcipients. *Int. J. Nanomed.* 2012. No 7. P. 403–415.

[16] **Neverovskaya Y., Voznyakovskii A.P., Dolmatov V.Y.** Structure of the dispersive medium and sedimentation resistance of suspensions of detonation nanodiamonds. *Phys. Solid State.* 2004. Vol. 46(4). P. 662–664.

[17] **Williams O.A., Hees J., Dieker C., Jäger W., Kirste L., Nebel C.E.** Size-Dependent Reactivity of Diamond Nanoparticles. *ACS nano.* 2010. Vol. 4(8). P. 4824–4830.

THE AUTHORS

VOZNYAKOVSKII Aleksei A. – *Ioffe institute*

E-mail: alexey_inform@mail.ru

KOLTSOVA Tatiiana S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: annelet@yandex.ru

KIDALOV Sergei V. – *Ioffe institute*

E-mail: kidalov@mail.ioffe.ru

TOLOCHKO Oleg V. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: ol_tol@hotmail.com

VOZNYAKOVSKII Aleksandr P. – *Institute of synthetic rubber*

E-mail: voznap@mail.ru

KUMSKOV Aleksandr L. – *National research center «Kurchatov institute»*

E-mail: faneva@mail.ru

Received: 16.01.2019