

DOI: 10.18721/JEST.24419
УДК 544.032.72; 675.043.42

Е.А. Буракова, А.В. Мележик, А.В. Герасимова

Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ДИСПЕРСИЙ ГРАФЕНОВЫХ НАНОПЛАСТИНОК

В работе показана возможность применения фенолформальдегидной смолы (ФФС) в качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) при получении устойчивых дисперсий графеновых нанопластинок (ГНП). Диспергирование окисленных ГНП в водной среде при 50 °С в присутствии ФФС позволяет получать стабильные коллоидные дисперсии с концентрацией до 1 %. Максимальная концентрация ГНП в водном растворе наблюдается при массовом соотношении «графен: сухой остаток ФФС» 2:1. Полученные дисперсии ГНП, переведенные в ацетон или изопропанол, могут быть применены в качестве модификаторов эпоксидных смол. Преимуществом применения ФФС в качестве ПАВ является отсутствие необходимости ее удаления из нанокompозита на основе ГНП. Предварительный эксперимент показал возможность применения полученных дисперсий в качестве исходного компонента в процессе синтеза нанокompозита «пористый углерод/ГНП» с удельной поверхностью 2300–2500 м²/г.

Ключевые слова: графеновые нанопластины; дисперсия, поверхностно-активное вещество, фенолформальдегидная смола, нанокompозит.

Ссылка при цитировании:

Е.А. Буракова, А.В. Мележик, А.В. Герасимова. Получение устойчивых дисперсий графеновых нанопластинок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 196–204. DOI: 10.18721/JEST.24419.

E.A. Burakova, A.V. Melezhik, A.V. Gerasimova

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

OBTAINING SUSTAINABLE DISPERSIONS OF GRAPHENE NANOPATELETS

This paper shows the possibility of using phenol-formaldehyde resin (PFR) as a surfactant in obtaining stable dispersions of graphene nanoplastic (GNP). Dispersion of oxidized GNP in an aqueous medium at 50 °C in the presence of PFR allows to obtain stable colloidal dispersions with a concentration of up to 1 %. The maximum concentration of GNP in an aqueous solution is observed at a mass ratio of 2: 1 graphene / dry residue of PFR. The resulting dispersions of GNP translated into acetone or isopropanol can be used as modifiers of epoxy resins. The advantage of using PFR as a surfactant is the absence of the need to remove it from the GNP-based nanocomposite. A preliminary experiment showed the possibility of using the obtained dispersions as an initial component in the process of synthesizing a porous carbon / GNP nanocomposite with a specific surface area of 2300–2500 m² / g.

Keywords: graphene nanoplatelets; dispersion, surfactant, phenolformaldehyde resin, nanocomposite.

Citation:

E.A. Burakova, A.V. Melezhik, A.V. Gerasimova, Gerasimova, Obtaining sustainable dispersions of graphene nanoplatelets, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 196–204, DOI: 10.18721/JEST.24419.

Введение

Благодаря своим многофункциональным свойствам углеродные наноматериалы (УНМ) нашли применение практически во всех научных и технических областях, не исключая создание новых конструкционных и функциональных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Зачастую эти современные материалы представляют собой наноконкомпозиты, в которых углеродные наноструктурные материалы выступают как наполнители. Один из самых эффективных углеродных нанонаполнителей – графен, обладающий уникальными свойствами – механическими, тепловыми, электрическими и др. [1–5]. Графен используют как наполнитель в бетонных и цементных композитах [6–8], полимерных бионаноконкомпозитах [9], антикоррозионных композитных покрытиях [10], гибридных [11] и металлических матричных композитах [12, 13].

Для получения наноконпозиционных материалов часто применяют классический способ, включающий следующие этапы:

получение стабильного высококонцентрированного коллоидного раствора наночастиц в дисперсионной среде (вода или неводный растворитель);

введение наноконпонентов в условиях, обеспечивающих самосборку наночастиц и их взаимодействие с матрицей;

стабилизацию полученного наноструктурного материала и его выделение из реакционной смеси.

Основной проблемой, с которой сталкиваются при получении композитных материалов, содержащих графены, является устранение агрегации графеновых нанопластинок (ГНП) и достижение их равномерного распределения в матрице композита [14, 15].

Обычно это достигается путем прививки функциональных групп [16] к поверхности ГНП и/или применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) в совокупности с

ультразвуковой обработкой [17,18]. Добиться равномерного распределения углеродных наноструктур в матрице композиционного материала при введении их в исходном состоянии (порошок) невозможно, так как удаление растворителя из дисперсии вызывает необратимую агрегацию ГНП. Именно поэтому большинство методов получения наноконпозиционных материалов включает введение наноструктурных компонентов в виде дисперсий [19, 20].

В качестве дисперсионной среды могут выступать вода и органические растворители. Однако известно, что получить высококонцентрированные и стабильные дисперсии ГНП достаточно сложно. Так, при ультразвуковой эксфолиации графитовых материалов в органических растворителях в присутствии ПАВ можно получить дисперсии малослойных ГНП, но концентрация графена в них не превысит нескольких сотых грамма в литре раствора, что затрудняет применение таких дисперсий в промышленном производстве наноконкомпозитных материалов. Тем не менее именно этот метод получения дисперсий наиболее предпочтителен для производства наноконкомпозитных материалов в промышленных масштабах. Для реализации данного метода необходимо уметь получать высококонцентрированные дисперсии ГНП и устранять проблему удаления применяемых ПАВ из конечного продукта. Анализ публикаций [21, 22] позволил выявить наиболее часто применяемые в процессе получения дисперсий ГНП поверхностно-активные вещества, такие, как додецилбензолсульфонат натрия (концентрация ГНП 0,002–0,05 г/л), гидрокси- и сульфопроизводные нафталиновых соединений, Тритон X-100 и др. Но их присутствие в наноконкомпозитах, полученных с применением этих дисперсий, нежелательно, и поэтому по-прежнему остается проблема удаления ПАВ.

Цель данной работы – исследование возможности применения в процессе получения

устойчивых дисперсий графеновых нанопластинок реакционноспособного ПАВ, не требующего дальнейшего удаления из полученных на их основе композитных материалов.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного углеродсодержащего сырья применяли расширенное соединение графита (РСГ), полученное методом расширения графита персульфатом аммония в серной кислоте [23]. РСГ представлял собой пасту (содержание сухого вещества в расчете на графит составляло 1 %). Ультразвуковую обработку проводили с использованием установки периодического действия ИЛ-10 с выходной мощностью 2 кВт и частотой 22 кГц (INLAB Ltd., Saint Petersburg, Russia).

В качестве реакционноспособного ПАВ использовали резольную водорастворимую фенолформальдегидную смолу (Фенотам GR-326, «Krata» Ltd., Tambov, Russia), называемую далее по тексту ФФС. Известно, что низкомолекулярные фенолформальдегидные олигомеры, полученные конденсацией фенола с формальдегидом в щелочной среде при избытке последнего, растворимы в воде. Благодаря высокой реакционной способности метилольных групп, содержащихся в данной смоле, при контакте ГНП с ФФС происходит модифицирование их поверхности. Модифицирование графеновых нанопластин ФФС способствует получению их высококонцентрированных и устойчивых дисперсий.

Эффективность применения ФФС в качестве ПАВ оценивали по способности графитового материала к эксфолиации и по степени агрегации РСГ. Степень расслоения РСГ при получении ГНП с этим ПАВ определяли по оптической плотности исследуемых дисперсий с применением фотоэлектрического колориметра КФК-3 (длина волны $\lambda = 500$ нм). Коэффициент светопоглощения полученных дисперсий (K л/г·см) определяли по методике, описанной в работе [24].

Для оценки морфологии полученных ГНП и композитов на их основе использовали двухлучевой сканирующий электронный микроскопический комплекс Neon 40 (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany). Полученные на основе ГНП дисперсии вводили в матрицу эпоксидной смолы с помощью трехвалковой машины ЕХАКТ (зазор между валками составлял 15:5 мкм, усилие 10 Н/мм). В качестве эпоксидной смолы применяли реакционноспособный олигомерный продукт на основе эпихлоргидрина и дифенилолпропана (ЭД-22).

Оценку агломератов в нанокompозите «ГНП – эпоксидная смола» осуществляли с помощью оптического микроскопа Микромед 1 (компания «Оптические приборы», Санкт-Петербург, Россия).

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Обычно дисперсии ГНП и углеродных нанотрубок устойчивы только при малой концентрации (не более 0,01–0,10 г/дм³), и применять такие дисперсии в процессе получения композитов нерационально. Как уже отмечено, одной из проблем при получении устойчивых дисперсий является подбор такого ПАВ, которое позволит получать высококонцентрированные системы углеродных наночастиц. В работе [25] экспериментально доказана эффективность применения ФФС в качестве ПАВ при получении устойчивых дисперсий углеродных нанотрубок (увеличение концентрации наноструктур в растворе на 2–3 порядка). В нашей работе была предпринята попытка применения способа, описанного авторами статьи [25], при работе с ГНП. Авторами в работе [26] было показано, что для эффективного модифицирования углеродных наноструктур фенолформальдегидными смолами их поверхность должна быть окисленной. Логично было бы предположить, что и поверхность ГНП должна быть окисленной для их эффективного модифицирования ФФС.

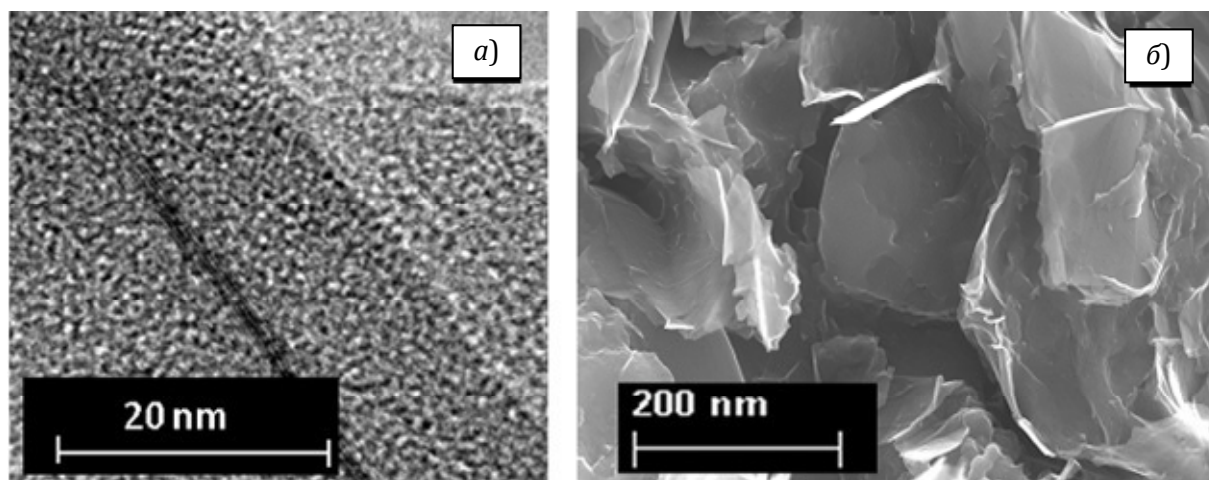


Рис. 1. ПЭМ (а) и СЭМ (б) изображения ГНП, полученных ультразвуковой эксфолиацией расширенного соединения графита

Fig. 1 TEM (a) and SEM (b) images of GNP, obtained by ultrasonic exfoliation of the expanded graphite compound

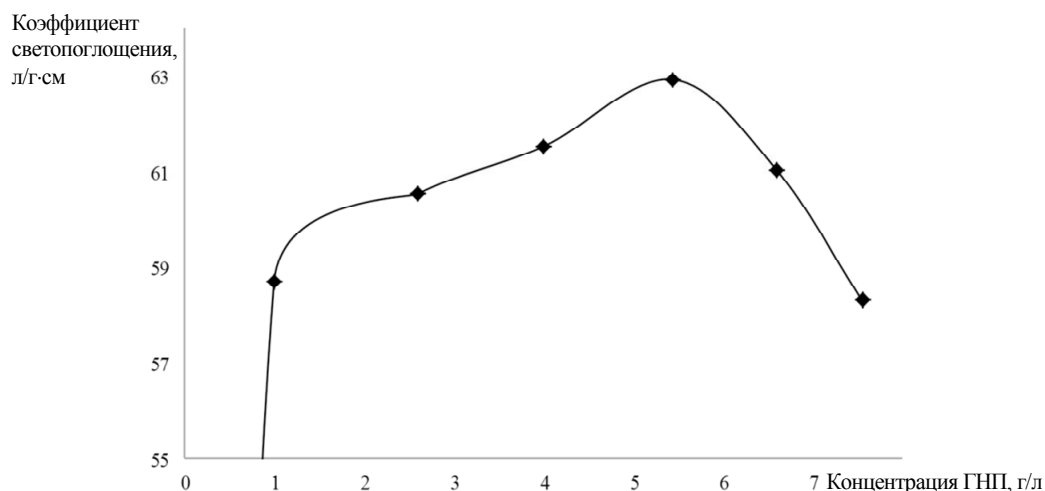


Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента светопоглощения дисперсии ГНП от их концентрации (в пересчете на углерод)

Fig. 2. The dependence of the effective coefficient of light absorption of the dispersion of GNP on their concentration (in terms of carbon)

В работе [27] было показано, что ГНП, полученные ультразвуковой эксфолиацией расширенного соединения графита, содержат значительное количество кислородсодержащих групп на поверхности. Таким образом, данная форма ГНП оптимальна для модифицирования фенолформальдегидной смолой.

Для приготовления водных дисперсий ГНП расширенное соединение графита, полученное способом, описанным в работе [23], диспергировали ультразвуком в воде в присут-

ствии небольшого количества ФФС. СЭМ и ПЭМ изображения полученных ГНП представлены на рис. 1.

В полученных дисперсиях осадка не наблюдалось, поэтому концентрацию ГНП в растворе рассчитывали непосредственно из взятой навески РСГ и объема раствора. Влияние концентрации ГНП на эффективную величину коэффициента светопоглощения K при концентрации ФФС 2,5 г/л (в расчете на сухой остаток ФФС) представлено на рис. 2.

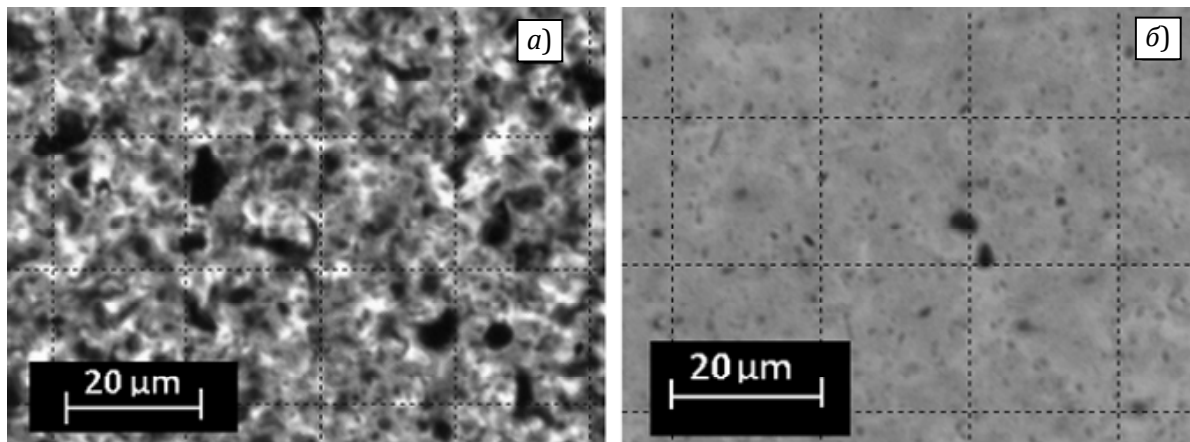


Рис. 3 Дисперсии ГНП в эпоксидной смоле: *а* – без ФФС; *б* – в присутствии ФФС
 Fig. 3. Dispersions of GNP in epoxy resin: *a* – without PFR; *b* – in the presence of PFR

Анализ полученной зависимости показал, что максимальная концентрация ГНП, переведенных в коллоидный раствор, соответствующая большему значению коэффициента светопоглощения K , наблюдается при массовом соотношении «графен : сухой остаток ФФС» 2:1.

Диспергирование ГНП в водной среде под действием ультразвука в присутствии обычных ПАВ не позволяет получать устойчивые концентрированные дисперсии из-за наличия в них агломератов размером 10–15 мкм. Однако диспергирование происходит гораздо эффективнее, если в качестве ПАВ применять ФФС. Процесс распределения наночастиц в водной среде, осуществленный при 50 °С в присутствии ФФС, позволяет получать стабильные коллоидные дисперсии ГНП с концентрацией до 1%.

Несмотря на это, области применения водных дисперсий весьма ограничены; чаще всего в качестве дисперсионной среды используют органические растворители.

Для введения ГНП в эпоксидную смолу необходимо в водной дисперсии заменить воду на ацетон или изопропанол, что легко осуществляется экспериментально. Изопропанольная паста ГНП хорошо совмещается с эпоксидной смолой ЭД-20, образуя прозрачный раствор без видимых агрегатов. Затем изопропанол удаляют в вакууме. Так, при введении в эпоксидную смолу немодифицированных ГНП наблюдаются круп-

ные агрегаты нанопластинок (рис. 3, *а*). Перевод водной дисперсии ГНП, полученных с применением классических ПАВ, в изопропанольную или ацетоновую пасты показали неэффективность их использования в качестве наномодификаторов эпоксидных смол.

В случае же ГНП, модифицированных ФФС, агрегаты в системе «ГНП – эпоксидная смола» практически отсутствуют (рис. 3, *б*).

Экспериментально выявлено, что стабильность полученных описанным способом дисперсий ГНП существенно зависит от pH из-за особенности поведения резольной ФФС в воде. ФФС полностью растворяется при $pH > 9$, но уже при снижении pH до 8 и ниже выпадает в осадок. Так же ведут себя и водные дисперсии ГНП, модифицированные ФФС. Чувствительность к pH связана с ионизацией фенольных групп. В слабощелочной среде нанокремниевые частицы, стабилизированные ФФС, приобретают отрицательный заряд, что препятствует их агрегации, и такая чувствительность к pH позволяет осуществлять целенаправленную сборку углеродных наноструктур в растворе. Проведенные эксперименты показали, что в высококонцентрированных дисперсиях ГНП, модифицированных ФФС, в определенных условиях возможен переход типа золь – гель, что предоставляет новые возможности для сборки углеродных наноструктур.

Интересно преимущество применения ФФС перед другими ПАВ в процессах получения высококонцентрированных и устойчивых дисперсий. Поскольку молекулы ФФС химически активны и могут взаимодействовать с другими молекулами или наночастицами, в том числе и эпоксидными смолами, то удаления ФФС из полученной эпоксидной композиции не требуется. При использовании же обычных ПАВ это является проблемой, так как наличие ПАВ существенно ухудшает свойства эпоксидной композиции.

Другая вероятная область применения графеновых материалов, модифицированных ФФС, – синтез углеродных наноматериалов с развитой поверхностью. Для их получения ГНП, модифицированные ФФС, распределяют в большем количестве исследуемого ПАВ, отверждают и подвергают химической активации расплавом гидроксида калия. Синтезированные таким способом материалы представляют собой нанокompозиты типа «(мезо- или микро-) пористый углерод – ГНП» (рис. 4), имеющие удельную поверхность 2300–2500 м²/г и размер пор в диапазоне от микропор до мезопор в зависимости от технологических режимов получения.

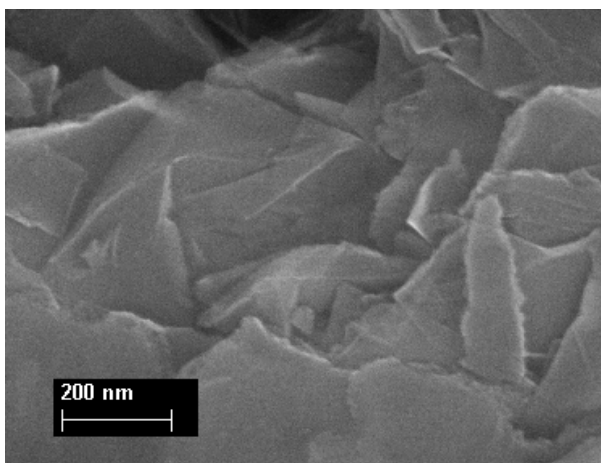


Рис. 4. СЭМ изображение материала мезопористый углерод/ГНП

Fig. 4. SEM image of the mesoporous carbon/GNP

Полученный нанокompозит «(мезо- или микро-) пористый углерод – ГНП» может применяться в качестве электродного материала для суперконденсаторов.

Была предпринята попытка создания многокомпонентных гибридных композитных материалов типа «углеродные нанотрубки – ГНП – ФФС». Для их синтеза использовали водные растворы окисленных нанотрубок и ГНП, модифицированных ФФС. При их фильтровании наблюдалась плотная укладка и пространственная ориентация нанотрубок относительно ГНП (рис. 5).

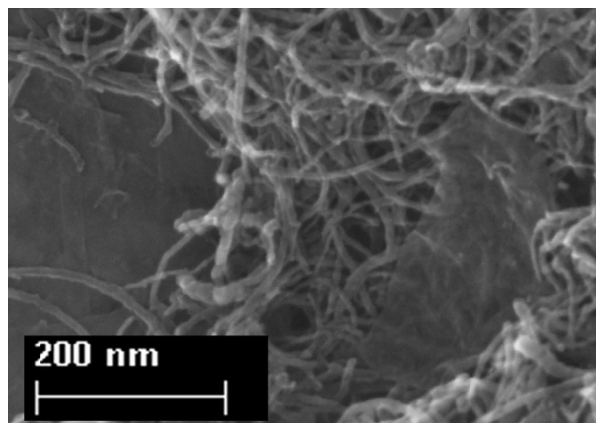


Рис. 5. СЭМ изображение полученного композитного материала углеродные нанотрубки/ФФС/ГНП

Fig. 5. SEM image of the resulting composite material carbon nanotubes / PFR / GNP

Такие материалы могут быть получены в виде пленок и покрытий, обладающих уникальными электрофизическими свойствами.

Выводы

Предварительные исследования показали, что использование фенолформальдегидной смолы в качестве ПАВ позволяет существенно увеличить концентрацию углеродных наночастиц в растворе и получать устойчивые дисперсии ГНП, которые могут использоваться в качестве наносоставляющей при

производстве композитных материалов. Доказано, что ФФС совместима со многими веществами, в том числе эпоксидными смолами, и не требует удаления из конечного продукта, что очень важно при производстве нанокompозитных материалов. Модифицирование ГНП фенолоформальдегидной смолой способствует проявлению эффекта, подобно-

го золь–гель переходу. Благодаря данному эффекту появляются новые возможности для сборки углеродных наноструктур и синтеза гибридных нанокompозитных материалов (например, «ГНП – нанотрубки – ФФС» или «диоксид титана – ГНП – нанотрубки»).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-53-00032 Бел_a

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Ragab T. Influence of vacancy defects on the damage mechanics of graphene nanoribbons // *Int. J. Damage Mech View Record in Scopus*, (2017), 26 (1). P. 28–48.
2. Zhang J., Ragab T., Basaran C. The effects of vacancy defect on the fracture behaviors of zigzag graphene nanoribbons // *Int. J. Damage Mech*. 2017. No 26 (4). P. 608–630.
3. Pedrielli A., Taioli S., Garberoglio G. Mechanical and thermal properties of graphene random nanofoams via Molecular Dynamics simulations // *Carbon*. 2018. Vol. 132. P. 766–775.
4. Phiri J., Johansson L-S., Gane P. A comparative study of mechanical, thermal and electrical properties of graphene-, graphene oxide- and reduced graphene oxide-doped microfibrillated cellulose nanocomposites // *Engineering*. 2018. Vol. 147. P. 104–113.
5. Zhanga J., Zhanga W., Ragabb T. Mechanical and electronic properties of graphene nanomesh heterojunctions // *Computational Materials Science*. 2018. Vol. 153. P. 64–72.
6. Le J.L., Du H., Pang S.D. Use of 2D Graphene Nanoplatelets (GNP) in cement composites for structural health evaluation // *Compos. Part B: Eng*. 2014. No 67. P. 555–563.
7. Du H., Pang S.D. Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet // *Cem. Concr. Res*. 2015. No 76. P. 10–19.
8. Du H., Pang S.D. Mechanical response and strain sensing of cement composites added with graphene nanoplatelet under tension // *Nanotechnol. Constr*. 2015. P. 377–382.
9. Cobos M., González B., Fernández M. J. Study on the effect of graphene and glycerol plasticizer on the properties of chitosan-graphene nanocomposites via in situ green chemical reduction of graphene oxide // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. Vol. 114. P. 599–613.
10. Yasin G.G., Khan M.A., Arif M. Synthesis of spheres-like Ni/graphene nanocomposite as an efficient anti-corrosive coating; effect of graphene content on its morphology and mechanical properties // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 755. P. 79–88.
11. Kosowska K., Domalik-Pyzik P., Nocuń M. Chitosan and graphene oxide/reduced graphene oxide hybrid nanocomposites – Evaluation of physicochemical properties // *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 216. P. 28–36.
12. Huang H., Tang X., Chen F. Radiation tolerance of nickel–graphene nanocomposite with disordered grapheme // *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 510. P. 1–9.
13. Moghadam A. D., Omrani E., Menezes P L. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene // *A review : Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 402–420.
14. Mu X.N., Cai H.N., Zhang H.M. Uniform dispersion and interface analysis of nickel coated graphene nanoflakes/ pure titanium matrix composites // *Carbon*. 2018. Vol. 137. P. 146–155.
15. Yang Z., Xu Z., Zhang L. Dispersion of graphene in chlorosulfonated polyethylene by slurry compounding // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 162. P. 156–162.
16. Дьячкова Т.П., Ткачев А.Г. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок: Монография. М.: Спектр, 2013. 152 с.
17. Tkalya E.E., Ghislandi M., With G.D. The use of surfactants for dispersing carbon nanotubes and graphene to make conductive nanocomposites // *Curr. Opin. Colloid Interface Sci*. 2012. No 17 (4). P. 225–232.
18. Chuah S., Pan Z., Sanjayan J.G. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide // *Build. Mater*. 2014. No 73. P. 113–124.



19. **Bai S., Jiang L., Xu N.** Enhancement of mechanical and electrical properties of graphene/cement composite due to improved dispersion of graphene by addition of silica fume // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 164. P. 433–441.
20. **Zhang Z., Qu J., Feng Y.** Assembly of graphene-aligned polymer composites for thermal conductive applications // *Composites Communications*. 2018. Vol. 9. P. 33–41
21. **Vaisman L., Wagner H.D., Marom G.** The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 128(130). P. 37–46.
22. **Rastogi R., Kaushal R., Tripathi S.K.** Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 328. P. 421–428.
23. **Melezhyk A.V., Tkachev A.G.** Synthesis of graphene nanoplate from peroxosulfate graphite intercalation compounds // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2014. No 5 (2). P. 294–306
24. **Melezhyk A.V., Kotov V.A., Tkachev A.G.** Optical Properties and Aggregation of Graphene Nanoplatelets // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2016. Vol. 16, no 1. P. 1067–1075.
25. **Burakova E.A., Gerasimova A.V., Melezhyk A.V.** A New Way of Developing Nanocomposites Based on Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets. *Nanopages*. 2016. P. 1–11, DOI: 10.1556/566.2016.0001.
26. **Герасимова А.В., Маянский М.О.** Влияние химической модификации углеродных нанотрубок на их диспергируемость в растворе фенолформальдегидной смолы // Сб. научных статей магистрантов ТГТУ. 2015. № 39. С. 83–86.
27. **Степаньян С.Г., Иванов А.Ю., Адамович Л.** Влияние кислородсодержащих групп на колебательные спектры оксида графена // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. 2016. № 14(4). С. 513–526.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУРАКОВА Елена Анатольевна — кандидат технических наук доцент Тамбовского государственного технического университета

E-mail: elenburakova@yandex.ru

МЕЛЕЖИК Александр Васильевич — кандидат химических наук старший научный сотрудник Тамбовского государственного технического университета

E-mail: nanocarbon@rambler.ru

ГЕРАСИМОВА Алена Владимировна — аспирант Тамбовского государственного технического университета

E-mail: alyona_gerasimova_92@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 08.10.2018

REFERENCES

- [1] **Zhang J., Ragab T.** Influence of vacancy defects on the damage mechanics of graphene nanoribbons. *Int. J. Damage Mech View Record in Scopus*, (2017), 26 (1). P. 28–48.
- [2] **Zhang J., Ragab T., Basaran C.** The effects of vacancy defect on the fracture behaviors of zigzag graphene nanoribbons. *Int. J. Damage Mech*. 2017. No 26 (4). P. 608–630.
- [3] **Pedrielli A., Taioli S., Garberoglio G.** Mechanical and thermal properties of graphene random nanofoams via Molecular Dynamics simulations. *Carbon*. 2018. Vol. 132. P. 766–775.
- [4] **Phiri J., Johansson L-S., Gane P.** A comparative study of mechanical, thermal and electrical properties of graphene-, graphene oxide- and reduced graphene oxide-doped microfibrillated cellulose nanocomposites. *Engineering*. 2018. Vol. 147. P. 104–113.
- [5] **Zhanga J., Zhanga W., Ragabb T.** Mechanical and electronic properties of graphene nanomesh heterojunctions. *Computational Materials Science*. 2018. Vol. 153. P. 64–72.
- [6] **Le J.L., Du H., Pang S.D.** Use of 2D Graphene Nanoplatelets (GNP) in cement composites for structural health evaluation. *Compos. Part B: Eng*. 2014. No 67. P. 555–563.
- [7] **Du H., Pang S.D.** Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet. *Cem. Concr. Res*. 2015. No 76. P. 10–19.
- [8] **Du H., Pang S.D.** Mechanical response and strain sensing of cement composites added with graphene nanoplatelet under tension. *Nanotechnol. Constr*. 2015. P. 377–382.
- [9] **Cobos M., González B., Fernández M. J.** Study on the effect of graphene and glycerol plasticizer on the properties of chitosan-graphene nanocomposites via in

situ green chemical reduction of graphene oxide. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. Vol. 114. P. 599–613.

[10] **Yasin G.G., Khan M.A., Arif M.** Synthesis of spheres-like Ni/graphene nanocomposite as an efficient anti-corrosive coating; effect of graphene content on its morphology and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 755. P. 79–88.

[11] **Kosowska K., Domalik-Pyzik P., Nocuń M.** Chitosan and graphene oxide/reduced graphene oxide hybrid nanocomposites – Evaluation of physicochemical properties. *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 216. P. 28–36.

[12] **Huang H, Tang X., Chen F.** Radiation tolerance of nickel–graphene nanocomposite with disordered graphene. *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 510. P. 1–9.

[13] **Moghadam A. D., Omrani E., Menezes P L.** Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene. *A review: Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 402–420.

[14] **Mu X.N., Cai H.N., Zhang H.M.** Uniform dispersion and interface analysis of nickel coated graphene nanoflakes/ pure titanium matrix composites. *Carbon*. 2018. Vol. 137. P. 146–155.

[15] **Yang Z., Xu Z., Zhang L.** Dispersion of graphene in chlorosulfonated polyethylene by slurry compounding. *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 162. P. 156–162.

[16] **Dyachkova T.P., Tkachev A.G.** Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok: Monografiya. M.: Spektr, 2013. 152 s. (rus.)

[17] **Tkalya E.E., Ghislandi M., With G.D.** The use of surfactants for dispersing carbon nanotubes and graphene to make conductive nanocomposites. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2012. No 17 (4). P. 225–232.

[18] **Chuah S., Pan Z., Sanjayan J.G.** Nano reinforced cement and concrete composites and new pers-

pective from graphene oxide. *Build. Mater.*, (2014), 73. P. 113–124.

[19] **Bai S., Jiang L., Xu N.** Enhancement of mechanical and electrical properties of graphene/cement composite due to improved dispersion of graphene by addition of silica fume. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 164. P. 433–441.

[20] **Zhang Z., Qu J., Feng Y.** Assembly of graphene-aligned polymer composites for thermal conductive applications. *Composites Communications*. 2018. Vol. 9. P. 33–41

[21] **Vaisman L., Wagner H.D., Marom G.** The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 128 (130). P. 37–46.

[22] **Rastogi R., Kaushal R., Tripathi S.K.** Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 328. P. 421–428.

[23] **Melezhyk A.V., Tkachev A.G.** Synthesis of graphene nanoplate from peroxosulfate graphite intercalation compounds. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2014. No 5 (2). P. 294–306

[24] **Melezhyk A.V., Kotov V.A., Tkachev A.G.** Optical Properties and Aggregation of Graphene Nanoplatelets. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2016. Vol. 16, no 1. P. 1067–1075.

[25] **Burakova E.A., Gerasimova A.V., Melezhyk A.V.** A New Way of Developing Nanocomposites Based on Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets. *Nanopages*, 2016. P. 1–11, DOI: 10.1556/566.2016.0001. (rus.)

[26] **Gerasimova A.V., Mayanskiy M.O.** Vliyaniye khimicheskoy modifikatsii uglerodnykh nanotrubok na ikh dispergiruyemost v rastvore fenolformaldegidnoy smoly. *Sb. nauchnykh statey magistrantov TGTU*. 2015. № 39. С. 83–86. (rus.)

[27] **Stepanyan S.G., Ivanov A.Yu., Adamovich L.** Vliyaniye kislorodsoderzhashchikh grupp na kolebatelnyye spektry oksida grafena. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii*. 2016. № 14(4). S. 513–526. (rus.)

THE AUTHORS

BURAKOVA Elena A. – Tambov state technical university

E-mail: elenburakova@yandex.ru

MELEZHNIK Aleksandr V. – Tambov state technical university

E-mail: nanocarbon@rambler.ru

GERASIMOVA Alena V. – Tambov state technical university

E-mail: alyona_gerasimova_92@mail.ru

Received 08.10.2018 г.