

# НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

## NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 3. С. 212—218.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-212-218

УДК 621.315

### Новое поколение нанокompозитных материалов на основе углерода и титана для использования в суперконденсаторных накопителях энергии

© 2019 г. В. В. Слепцов<sup>1</sup>, Л. В. Кожитов<sup>2</sup>, А. О. Дителева<sup>1</sup>, Д. Ю. Кукушкин<sup>1,§</sup>, А. А. Нагаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрены перспективные нанокompозитные материалы на основе углерода и титана. Показано, что особый интерес представляет использование высокопористой матрицы. Материалы на основе таких матриц имеют минимальные весовые и высокие прочностные характеристики. Также в работе охарактеризованы композиты на основе пористых углеродных волокон с оксидами металлов. Направления получения композитов условно можно разделить на три вида: матричный способ, покрытие готовых наночастиц инертной оболочкой, образование наночастиц и матриц в одном процессе. Покрытие наночастиц инертной оболочкой позволяет предотвратить их окисление и сохранить необходимые магнитные свойства. При использовании таких методов как ИК-пиролиз, дуговое испарение образуются сторонние метал-углеродные фазы, которые загрязняют получаемый материал. Чтобы этого избежать, используют восстановители, например водород при закоксовывании наночастиц в токе метановой плазмы восстанавливает частицы металла из его золь-геля и не дает им вступить в реакцию с углеродом. Но при таком способе трудно контролировать размер частиц. Использование же готовой матрицы позволяет контролировать размер наночастиц. Однако, в таком методе используются высокие температуры, а иногда и водород, что усложняет процесс получения. Основной проблемой в области нанокompозитов является поиск более технологичных, простых, дешевых и экологичных методов получения нанокompозитов с высокими эксплуатационными характеристиками. Разработанная технология формирования порового пространства исходной углеродной матрицы не имеет вышеперечисленных недостатков. Данная технология имеет простое, дешевое, экологически чистое оформление, в процессе получения нанокompозитов не применяются высокие температуры и не образуются сторонние метал-углеродные фазы. Полученные нанокompозитные материалы были использованы в качестве электродов сверхъёмких конденсаторных структур. При исследовании емкостных и электрических характеристик образцов было выявлено, что формирование металла на пористой углеродной матрице позволяет существенно уменьшить внутреннее сопротивление ячейки и увеличить удельную энергоёмкость.

**Ключевые слова:** нанокompозитные материалы, метал-углеродные нанокompозиты, сверхпористые материалы на основе углерода, наноструктурированные углеродные материалы, сверхъёмкие конденсаторные структуры, накопители энергии, электродные материалы

#### Введение

Весь окружающий нас мир представляет собой продукт взаимодействия энергии (материалы, кинетическая и потенциальная энергия и т. д.) с пространством. Причем природные технологии максимально эффективно используют пространство.

**Слепцов Владимир Владимирович**<sup>1</sup> — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: 08fraktal@inbox.ru; **Кожитов Лев Васильевич**<sup>2</sup> — доктор техн. наук, профессор, e-mail: kozitov@isis.ru; **Дителева Анна Олеговна**<sup>1</sup> — ассистент, e-mail: anna.diteleva@mail.ru; **Кукушкин Дмитрий Юрьевич**<sup>1,§</sup> — канд. техн. наук, ассистент, e-mail: Skyline34@nxt.ru; **Нагаев Артем Алексеевич**<sup>2</sup> — студент, e-mail: temnagaew@yandex.ru

§ Автор для переписки

Например, доля пространства в атоме на девять порядков больше, чем энергия, которая, в основном, сосредоточена в ядре. Гравитационный радиус Земли составляет 0,44 см, а реальный радиус Земли имеет  $3 \cdot 10^8$  м. Эти примеры однозначно свидетельствуют о том, что природа очень эффективно использует пространство для формирования окружающего нас материального мира. В последнее время активно стали развиваться технологии получения композитных, нанокompозитных и высокопористых материалов, в которых удастся значительно (в разы, а иногда и на порядки) снизить материалоемкость и получить рекордные характеристики по прочности, пластичности, усталостным характеристикам, коррозионной стойкости, теплопроводности и целому ряду других параметров [1]. Данные технологии представляют из себя интеграцию традиционных материалов (титан и углерод) в виде высокопористой матрицы, в которой до 95 % объема составляют пустоты (поровое пространство) и только 5 % — это собственно углерод, титан, металлы и их сплавы. Сочетание этих материалов с комбинируемой технологией формирования порового пространства исходной матрицы позволяет создавать новые продукты, остро востребованные в формирующемся новом мировом технологическом укладе.

Направления получения композитов условно можно разделить на три вида: матричный способ, покрытие готовых наночастиц инертной оболочкой, образование наночастиц и матриц в одном процессе. Покрытие наночастиц инертной оболочкой позволяет предотвратить их окисление и сохранить необходимые магнитные свойства. При использовании таких методов как ИК-пиролиз, дуговое испарение образуются сторонние метал-углеродные фазы, которые загрязняют получаемый материал. Чтобы этого избежать, используют восстановители, например водород при закоксовывании наночастиц в токе метановой плазмы восстанавливает частицы металла из его золь-геля и не дает им вступить

в реакцию с углеродом. Но при таком способе трудно контролировать размер частиц. Использование же готовой матрицы позволяет контролировать размер наночастиц. Однако, в таком методе используются высокие температуры, а иногда и водород, что усложняет процесс получения [2].

Получение оксидов и гидроксидов переходных металлов на поверхности углеродных, металлических и других проводящих подложек является актуальной задачей в области получения новых материалов для электрохимических источников тока [3—6].

При формировании гидроксидов никеля или кобальта на высокопроводящих подложках из пени- никеля [7, 8] удалось получить высокие емкостные характеристики 3152 Ф/г за счет низких потерь на внутреннем сопротивлении.

В работе [9] методом химического осаждения был получен тонкослойный неорганический сорбент  $\text{TiO}_2$  на матрице из активированного угля с помощью гидролиза солей титана в присутствии мочевины и комплексообразующего агента. Так же осаждение оксида титана на поверхность катода из углеродного материала проводили электрохимическим способом [10]. При образовании покрытия на основе гидроксида титана (осажденного химическим и электрохимическим способами) происходит формирование иерархической структуры размеров агрегатов растущей фазы из сферических частиц размером 10—15 нм. При химическом осаждении образуется сплошное покрытие в виде слипающихся частиц (рис. 1, а и б), а при электрохимическом — формируется равномерная пленка (рис. 1, в).

В композитах, полученных химическим осаждением, происходит увеличение удельной емкости по сравнению с активированным углем от 47,2 до 63,1 Ф/г при оптимальном содержании  $\text{TiO}_2$  14,3 %. В композитах, в которых углеродное волокно модифицировано электрохимическим способом, наблюдается возрастание емкости по сравнению с мате-

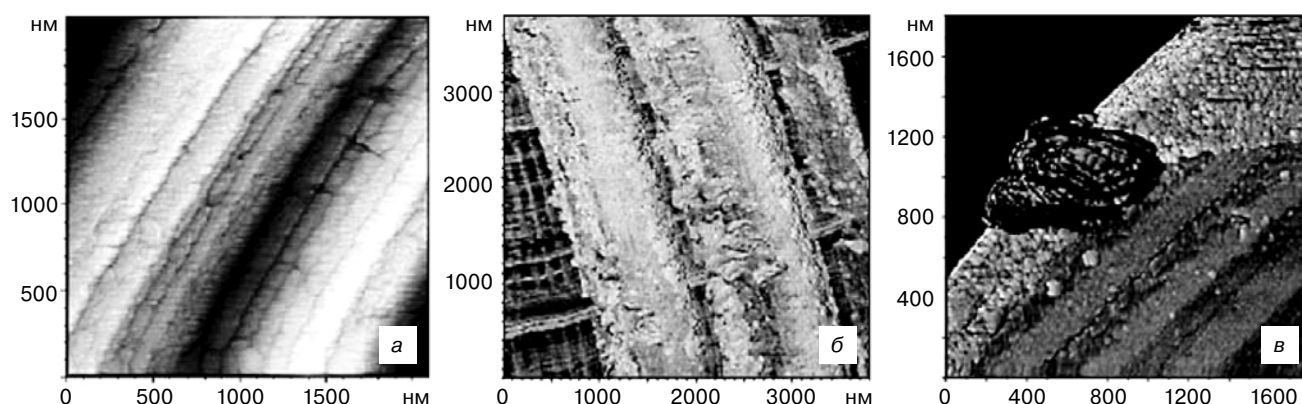


Рис. 1. АСМ-изображение углеродного волокна: исходное (а), модифицированное гидроксидом титана путем химического осаждения (б) и электрохимическим способом (в) [9]

Fig. 1. AFM image of carbon fiber: (a) initial, (б) modified with titanium hydroxide by chemical deposition (в) and electrochemical method [9]

риалом, полученным химическим способом (80,0 и 58,4 Ф/г соответственно) при содержании  $\text{TiO}_2$  около 12 % [11, 12].

Наиболее перспективным материалом для электродов высокоэнергетических устройств является оксид марганца вследствие его низкой стоимости. Однако в силу того что он обладает низкой проводимостью, для изготовления композитных электродов вносят проводящие добавки, например углеродные нанотрубки как альтернативу проводящей саже [13].

В работе [14] оксид марганца наносили на пористое активированное углеродистое волокно (АУВ) химическим и электрохимическим способом. На рис. 2 показано ЭСМ-изображение поверхности модифицированного углеродного волокна оксидом марганца. Величины емкостей и параметры заряжения

электродных материалов представлены в таблице.

Интерес к гидроксидам никеля связан с использованием их в качестве катодных материалов в щелочных перезаряжаемых батареях и суперконденсаторах. Весьма эффективным материалом, который может быть использован в композитах с оксидом никеля, является углеродное волокно, так как оно обладает высокоразвитой поверхностью и может служить как подложка, в том числе при электроосаждении. Оксид никеля на поверхность углеродного волокна осаждали золь-гель-методом.

**Величины емкости и параметры заряжения электродных материалов** [Values of capacitance and charging parameters of electrode materials] [14]

Образец	C, Ф/г	R, Ом	$\tau$ , с
АУВ (исх.)	53,0	60,1	413,5
АУВ Mn (хим.)	53,1	80,0	5016,0
АУВ Mn (эл-хим.)	53,3	11,77	613,1

*Примечание.* R — омическое сопротивление электролита в порах,  $\tau$  — характеристическое время заряжения двойного электрического слоя.

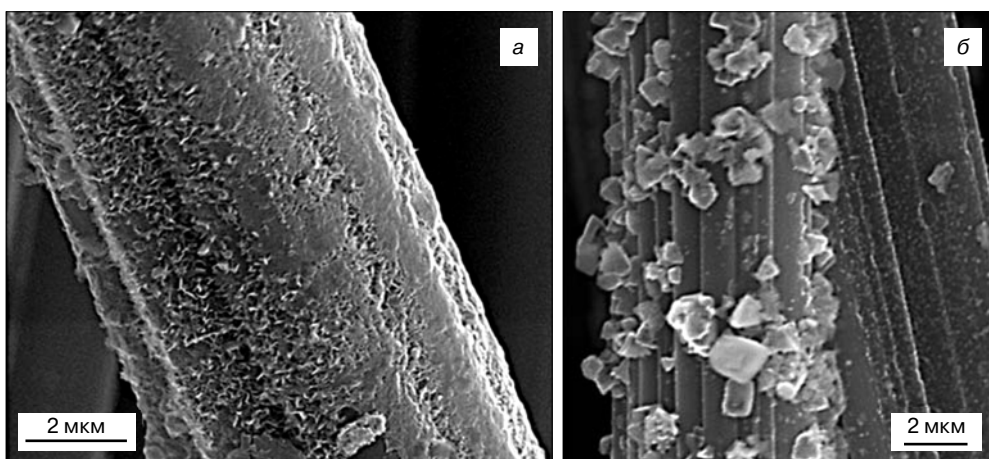


Рис. 2. ЭСМ-изображение поверхности модифицированных УВМ: а — химическим осаждением АУВ-Mn; б — электрохимическим АУВ-Mn [14]

Fig. 2. EFM image of the surface of modified carbon fibers: (a) chemical deposition ACF-Mn, (b) electrochemical ACF-Mn [14]



Рис. 3. АСМ-изображение разных участков поверхности АУВ, модифицированных гидроксидом никеля [15]

Figure 3. AFM image of different areas of the ACF surface modified with nickel hydroxide [15]

На рис. 3 видно, что частицы модификатора — гидроксида никеля располагаются на поверхности активированного углеродного волокна в виде сфер достаточно правильной формы, однородных по размерам (~30—50 нм) и складываются в группы частиц цилиндрической формы [15].

Основной проблемой в области нанокомпозитов является поиск более технологичных, простых, дешевых и экологичных методов получения нанокомпозитов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Поэтому целью нашей работы было разработать технологию формирования порового пространства исходной углеродной матрицы, которая не имеет вышеперечисленных недостатков.

### Комбинируемая технология формирования нанокомпозитных материалов на основе углерода и титана

Был разработан технологический комплекс обработки поверхности материалов наночастицами металлов, включая обработку порового пространства



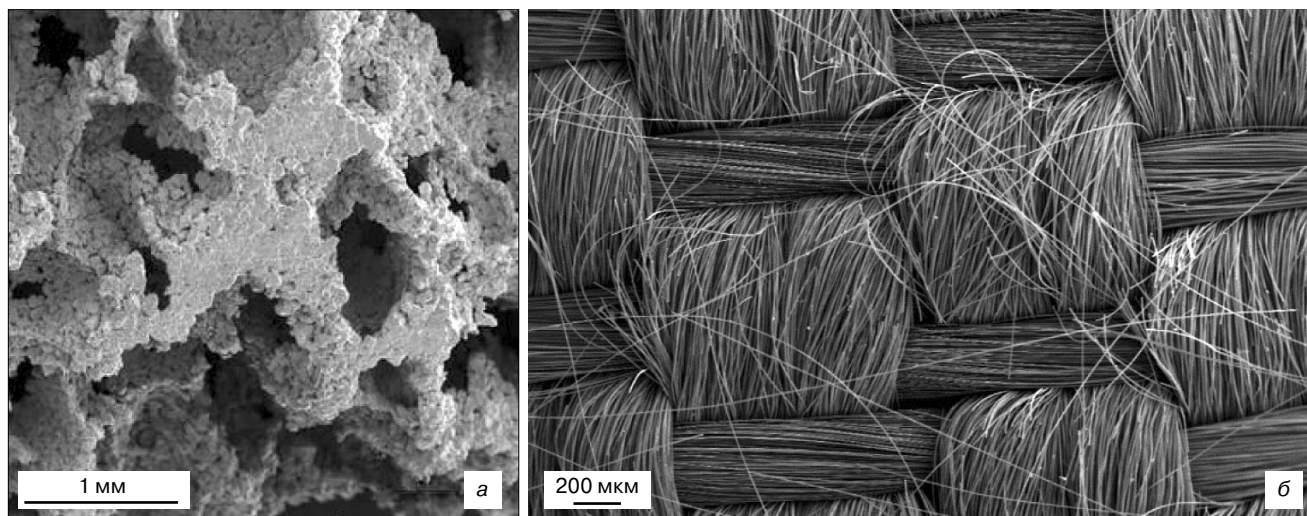


Рис. 4. Исходная матрица на основе титана (а) [16] и на основе углерода (б)

Fig. 4. Initial matrix based on titanium (a) [16] and based on carbon (б)

материалов с высокой удельной поверхностью (более  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) с целью придания ей заданных электрофизических характеристик.

Основой данной технологии является исходная матрица, имеющая высокую удельную поверхность (до  $2500\text{—}3000 \text{ м}^2/\text{г}$ ), поровое пространство которой формируется в зависимости от решаемой задачи. Предлагается использовать в качестве матрицы пористые материалы на основе титана и углерода. Выбор в качестве исходной матрицы углерода и титана определяется тем, что конструкционные материалы на их основе имеют минимальные весовые характеристики (плотность углерода  $1,8\text{—}3,53 \text{ г}/\text{см}^3$ , а титана  $4,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ) и высокие прочностные характеристики.

Ячеистые или пористые структуры на основе титана Ti и его сплавов (Ti–6Al–4V), представленные на рис. 4, а [16], часто называемые пенометаллами, представляют собой материалы, состоящие как минимум из двух фаз: твердой металлической матрицы в виде открытой ячеистой структуры с размером пор  $50 \text{ мкм}$  и пористостью  $70 \%$  и фазы, заполняющей поровое пространство. На рис. 4, б представлен снимок углеродного материала со сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO 40. Изображенный углеродный материал в виде ткани имеет рекордные механические характеристики, развитую пористую структуру и обеспечивает высокую экономичность за счет применения рулонных технологий.

Каждый из этих материалов имеет большое количество плюсов, но и, соответствующие, минусы, которые при создании комбинированной технологии, сводятся к минимуму. Основной недостаток электродов из углеродных материалов — высокое сопротивление, которое может быть частично компенсировано нанесением металлизации на углеродные электроды. В настоящее время освоены технологии металлизации, такие как: напыление вакуумное;

гальваническое осаждение; химическое осаждение; газоразрядные реакции из металлоорганических соединений. По нашему мнению, в данных условиях рационально использование вакуумного осаждения пленок Ti в атмосфере  $\text{N}_2$ . При этом, на осаждаемой поверхности выращивается пленка, имеющая столбчатую структуру с сильно развитой поверхностью [17], представленная на рис. 5. Снимки (рис. 5) получены при помощи сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO 40.

Вторая, существенно более сложная технологическая задача — нанесение слоя металла на каждую ниточку, которая решается за счет интеграции вакуумных технологий металлизации (рис. 5, а) с электроимпульсными технологиями формирования наночастиц в жидкой среде. Как известно, частицы нанометрового размера обладают рядом уникальных свойств. Они несут положительный заряд, а их электрофизические и физико-химические свойства определяются размерами наночастиц [18]. Поэтому основной задачей являлось получение частиц металла с заданным размерным диапазоном (обычно  $2\text{—}10 \text{ нм}$ ) и последующее позиционирование их в поровое пространство методом электрофореза (рис. 5, б) [19]. При этом на осаждаемой поверхности выращивается пленка, имеющая столбчатую структуру с сильно развитой поверхностью (рис. 6). Эта обработка обеспечивает принципиальную возможность формирования покрытия на всей поверхности высокопористого материала, что снижает электрическое сопротивление и стабилизирует параметры электродного материала [20].

Данная комбинированная технология имеет простое, дешевое, экологически чистое оформление, в процессе получения нанокомпозитов не применяются высокие температуры и не образуются сторонние металл-углеродные фазы.

Полученные нанокомпозитные материалы были использованы в качестве электродов сверхъёмких

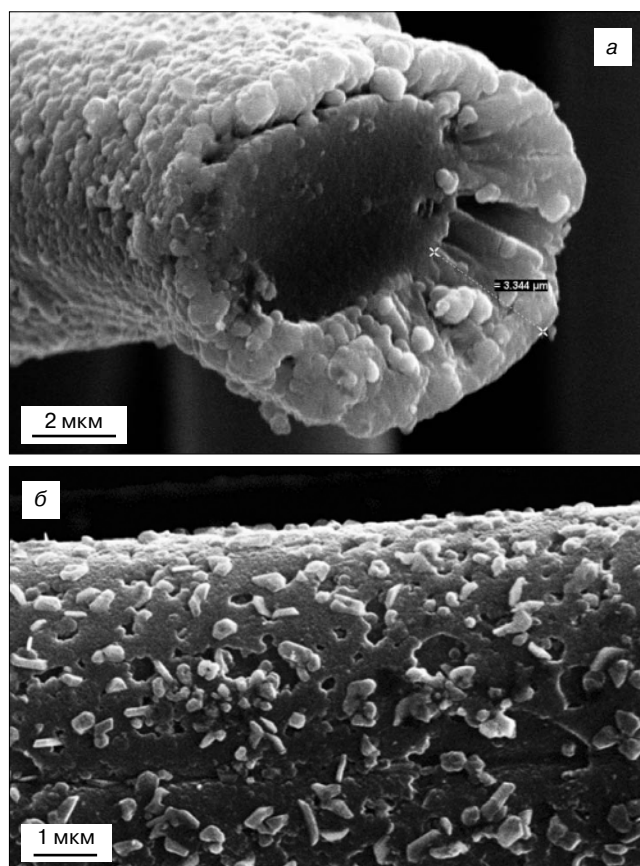


Рис. 5. Комбинированная технология формирования нанокомпозитных материалов на основе углерода:  
а — нить углеродного волокна, покрытая слоем титана;  
б — модифицированная наночастицами серебра нить углеродного волокна

Fig. 5. Combined technology for the formation of carbon-based nanocomposite materials:  
(a) carbon fiber thread covered with a titanium layer,  
(b) carbon fiber thread modified with silver nanoparticles

конденсаторных структур. При исследовании емкостных и электрических характеристик образцов было выявлено, что формирование металла на пористой углеродной матрице позволяет уменьшить внутреннее сопротивление ячейки на 40 % и увеличить удельную энергоемкость в 4,5 раза.

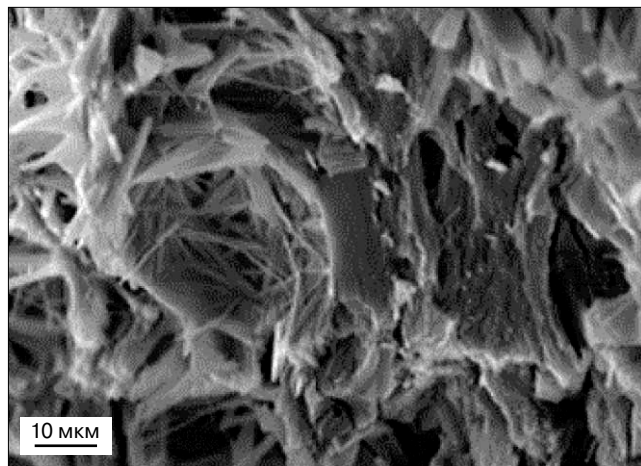


Рис. 6. Слой полититаната калия (ПТК), выращенный на титане [23]

Fig. 6. Layer of potassium polytitanate grown on titanium [23]

Таким же образом, использование в комбинированной технологии полититаната калия, имеющего низкую проводимость по постоянному току и высокую ионную проводимость, обеспечивают применение этих материалов для создания суперконденсаторных структур (СКС), конструкционных материалов с высокой поглощающей способностью СВЧ излучения за счет аномально высокой величины диэлектрической проницаемости (больше  $10^7$ ) (рис. 6) [21—23].

При формировании свойств поровой поверхности исходной матрицы за счет заполнения ее различными по своей природе активными материалами, позволяет создавать новое поколение энергонасыщенных материалов с рекордными характеристиками:

- очень низкое значение коэффициента трения в различных парах трения с металлами и керамическими материалами (0,01—0,05 в различных парах трения);
- высокие прочностные свойства (модуль упругости 270—290 МПа) при низкой твердости (3—4 по шкале Мооса);
- высокая термостойкость (от 1100 до 1600 °C для различных модификаций);
- высокая стойкость к тепловому удару (изделия из ПТК выдерживают более 30 теплосмен в интервале 25—1300 °C с сохранением своих механических свойств);
- очень высокая химическая стойкость к действию концентрированных щелочных растворов и расплавов щелочей;
- низкая теплопроводность (0,03—0,04 Вт/(м·К) при 23 °C);
- очень высокое значение коэффициента отражения теплового излучения (93—97 % при толщине 0,3 мм).

### Заключение

Таким образом, описанные материалы обладают необходимым спектром свойств, которые позволяют создавать на их основе нанокомпозитные материалы с уникальными характеристиками. Разработка нового поколения многофункциональных, энергонасыщенных, нанокомпозитных конструкционных материалов на основе углерода и титана является перспективной и актуальной в области энергетики, транспорта, приборостроения и машиностроения.

### Библиографический список

1. Пелевин Ф. В. Технология изготовления пористых материалов // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. 2007. Т. 1, № 3. С. 46—51.
2. Воропай А. Н. Получение наноструктурированных композитов на основе высокопористых углеродных матриц, наполненных Ni или Ni(OH)<sub>2</sub>, определение факторов, влияющих на их физико-химические свойства: автореф. дисс. канд. хим. наук. Кемерово, 2014. 23 с.



3. Burke A. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology // *J. Power Sources*. 2000. V. 91, Iss. 1. P. 37—50. DOI: 10.1016/S0378-7753(00)00485-7
4. Simon P., Gogotsi Yu. Materials for electrochemical capacitors // *Nature materials*. 2008. V. 7. P. 845—854. DOI: 10.1038/nmat2297
5. Kötz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // *Electrochimica Acta*. 2000. V. 45, Iss. 15–16. P. 2483—2498. DOI: 10.1016/S0013-4686(00)00354-6
6. Балышков А. Ионисторы // *Электронные компоненты*. 2005. № 11/12. С. 91—97.
7. Zhou W.-J., Xu M.-W., Zhao D.-D., Xu C.-L., Li H.-L. Electrodeposition and characterization of ordered mesoporous cobalt hydroxide films on different substrates for supercapacitors // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2009. V. 117, Iss. 1–2. P. 55—60. DOI: 10.1016/j.micromeso.2008.06.004
8. Wutao Wei, Liwei Mi, Yang Gao, Zhi Zheng, Weihua Chen, Xinxin Guan. Partial ion-exchange of nickel-sulfide-derived electrodes for high performance supercapacitors // *Chem. Mater*. 2014. V. 26, Iss. 11. P. 3418—3426. DOI: 10.1021/cm5006482
9. Пат. 2026732 (РФ). Способ получения сорбента для выделения белков / В. А. Василевский, В. А. Авраменко, Л. А. Земскова, Т. А. Сокольниковская, 1995.
10. Пат. 2075170 (РФ). Способ получения тонкослойных неорганических сорбентов / Л. А. Земскова, Е. Л. Якимович, В. А. Авраменко, В. В. Железнов, В. Ю. Глушенко, 1997.
11. Liang H., Chen F., Li R., Wang L., Deng Z. Electrochemical study of activated carbon-semiconducting oxide composites as electrode materials of double-layer capacitors // *Electrochimica Acta*. 2004. V. 49, Iss. 21. P. 3463—3467. DOI: 10.1016/j.electacta.2004.03.016
12. Шевелева И. В., Земскова Л. А., Войт А. В., Железнов С. В., Курявый В. Г. Взаимосвязь электрохимических и структурных свойств модифицированных углеродных волокон // *Журн. прикл. химии*. 2007. Т. 80, № 5. С. 761—766.
13. New carbon based materials for electrochemical energy storage systems: batteries, supercapacitors and fuel cells / Eds. by I. V. Barsukov, C. S. Johnson, J. E. Doninger, V. Z. Barsukov. Dordrecht: (Netherlands), 2006. P. 33—41. DOI: 10.1007/1-4020-4812-2
14. Земскова Л. А., Шевелева И. В., Баринов Н. Н., Кайдалова Т. А., Войт А. В., Железнов С. В. Оксидно-марганцевые углеродные волокнистые материалы // *Журн. прикл. химии*. 2008. Т. 81, № 7. С. 1109—1114.
15. Земскова Л. А. Модифицированные углеродные волокна: сорбенты, электродные материалы, катализаторы // *Вестник ДВО РАН*. 2009. № 2. С. 39—52.
16. Jakubowicz J., Adamek G., Dewidar M. Titanium foam made with saccharose as a space holder // *J. Porous. Mater*. 2013. V. 20. P. 1137—1141. DOI: 10.1007/s10934-013-9696-0
17. Ву Д. Х., Слепцов В. В. Разработка технологии получения электродных материалов // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 11–2. С. 22—29. DOI: 10.18454/IRJ.2015.42.095
18. Слепцов В. В. Физико-химические основы наноматериалов и нанотехнологий. Москва: МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2015. 196 с.
19. Нестеров В. А., Кукушкин Д. Ю., Козлов А. П. Исследование процесса металлизации пористых материалов осаждением нанокластеров металлов на поверхность методом электрофореза // *Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения-2018»*. М.: МАИ, 2018. С. 281.
20. Слепцов В. В., Савкин А. В., Кукушкин Д. Ю., Дителева А. О. Исследование процесса осаждения нанокластеров металлов на поверхность пористых материалов методом электрофореза // *Вестник машиностроения*. 2018. № 9. С. 45—47.
21. Гоффман В. Г., Гороховский А. В., Горшков Н. В., Телегина О. С., Ковнев А. В., Орозалиев Э. Э., Слепцов В. В. Импедансная спектроскопия полимерного композита на основе базового полититаната калия // *Электрохимическая энергетика*. 2014. Т. 14, № 3. С. 141—148.
22. Гороховский А. В., Палагин А. И., Панова Л. Г., Устинова Т. П., Бурмистров И. Н., Аристов Д. В. Производство субмикронаноразмерных полититанатов калия и композиционных материалов на их основе // *Нанотехника*. 2009. № 3. С. 38—44.
23. Гороховский А. В., Панова Л. Г., Бурмистров И. Н., Устинова Т. П., Лёвкина Н. Л. Полититанаты калия с волокнистой и чешуйчатой структурой: синтез и применение // *Международный форум по нано-технологии: Сб. докладов научно-технологических секций: в 2 т. М.: Роснано, 2008. Т. 1. С. 168—169.*

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2019 г.

*Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 212—218. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-212-218

## A new generation of nanocomposite materials based on carbon and titanium for use in supercapacitor energy storage devices

V. V. Sleptsov<sup>1</sup>, L. V. Kozitov<sup>2</sup>, A. O. Diteleva<sup>1</sup>, D. Yu. Kukushkin<sup>1,§</sup>, A. A. Nagaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia*

<sup>2</sup> *National University of Science and Technology MISiS,  
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia*

**Abstract.** In this paper, promising nanocomposite materials based on carbon and titanium are considered. It is shown that the use of a highly porous matrix is of particular interest. Materials based on such matrices have minimal weight and high strength characteristics. The paper also describes composites based on porous carbon fibers with metal oxides. The directions for producing composites can be divided into three types: matrix method, coating of finished nanoparticles with an inert shell, and the formation of nanoparticles and matrices in one process. The coating of nanoparticles with an inert shell prevents their oxidation and preserves the necessary magnetic properties. When using methods such as IR pyrolysis,

### Information about authors:

**Vladimir V. Sleptsov**<sup>1</sup>: Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department (08fraktal@inbox.ru); **Lev V. Kozitov**<sup>2</sup>: Dr. Sci. (Eng.), Professor, (kozitov@misis.ru); **Anna O. Diteleva**<sup>1</sup>: Assistant (anna.diteleva@mail.ru); **Dmitry Yu. Kukushkin**<sup>1,§</sup>: Cand. Sci. (Eng.), Assistant (Skyline34@nxt.ru); **Artem A. Nagaev**<sup>2</sup>: Student (temnagaevv@yandex.ru)

§ Corresponding author

arc evaporation forms third-party metal-carbon phases that pollute the resulting material. To avoid this, reducing agents are used, for example, hydrogen when coking nanoparticles in a methane plasma current restores metal particles from its Sol-gel and prevents them from reacting with carbon. But with this method, it is difficult to control the particle size. Using a ready-made matrix allows you to control the size of nanoparticles. However, this method uses high temperatures, and sometimes hydrogen, which complicates the production process. The main problem in the field of nanocomposites is the search for more technological, simple, cheap and environmentally friendly methods for obtaining nanocomposites with high performance characteristics. The developed technology for forming the pore space of the initial carbon matrix does not have the above disadvantages. This technology has a simple, cheap, environmentally friendly design. high temperatures are not used in the process of producing nanocomposites and third-party metal-carbon phases are not formed. The resulting nanocomposite materials were used as electrodes for ultra-high-volume capacitor structures. When studying the capacitance and electrical characteristics of samples, it was found that the formation of metal on a porous carbon matrix can significantly reduce the internal resistance of the cell and increase the specific energy consumption.

**Keywords:** nanocomposite materials, metal-carbon nanocomposites, superporous carbon-based materials, nanostructured carbon materials, ultra-large capacitor structures, energy storage, electrode materials

### References

1. Pelevin F. V. Technology for manufacturing porous materials. *Bulletin of the Association of tourism and service universities*, 2007, vol. 1, no. 3, pp. 46—51. (In Russ.)
2. Voropai A. N. *Poluchenie nanostrukturirovannykh kompozitov na osnove vysokoporiistyykh uglerodnykh matrits, napolnennykh Ni ili Ni(OH)<sub>2</sub>, opredelenie faktorov, vliyayushchikh na ikh fiziko-khimicheskie svoystva* [Obtaining nanostructured composites based on highly porous carbon matrices filled with Ni or Ni(OH)<sub>2</sub>, determination of factors affecting their physicochemical properties.] Summary of Diss. Cand. Sci. Chem. Kemerovo, 2014, 23 p. (In Russ.)
3. Burke A. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *J. Power Sources*, 2000, vol. 91, no. 1, pp. 37—50. DOI: 10.1016/S0378-7753(00)00485-7
4. Simon P., Gogotsi Yu. Materials for electrochemical capacitors. *Nature materials*, 2008, vol. 7, pp. 845—854. DOI: 10.1038/nmat2297
5. Kötze R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 2000, vol. 45, no. 15—16, pp. 2483—2498. DOI: 10.1016/S0013-4686(00)00354-6
6. Balyshkov A. Ionistors. *Elektronnye komponenty*, 2005, no. 11/12, pp. 91—97. (In Russ.)
7. Zhou W.-J., Xu M.-W., Zhao D.-D., Xu C.-L., Li H.-L. Electrodeposition and characterization of ordered mesoporous cobalt hydroxide films on different substrates for supercapacitors. *Micro-porous and Mesoporous Materials*, 2009, vol. 117, no. 1—2, pp. 55—60. DOI: 10.1016/j.micromeso.2008.06.004
8. Wutao Wei, Liwei Mi, Yang Gao, Zhi Zheng, Weihua Chen, Xinxin Guan. Partial ion-exchange of nickel-sulfide-derived electrodes for high performance supercapacitors. *Chem. Mater.*, 2014, vol. 26, no. 11, pp. 3418—3426. DOI: 10.1021/cm5006482
9. Patent 2026732 (RF). *Sposob polucheniya sorbenta dlya vydeleniya belkov* [A method of producing a sorbent for the isolation of proteins]. V. A. Vasilevskii, V. A. Avramenko, L. A. Zemskova, T. A. Sokol'nitskaya, 1995. (In Russ.)
10. Patent 2075170 (RF). *Sposob polucheniya tonkosloinykh neorganicheskikh sorbentov* [A method of obtaining thin-layer inorganic sorbents]. L. A. Zemskova, E. L. Yakimovich, V. A. Avramenko, V. V. Zhelezov, V. Yu. Glushchenko, 1997. (In Russ.)
11. Liang H., Chen F., Li R., Wang L., Deng Z. Electrochemical study of activated carbon-semiconducting oxide composites as electrode materials of double-layer capacitors // *Electrochimica Acta*, 2004, vol. 49, no. 21, pp. 3463—3467. DOI: 10.1016/j.electacta.2004.03.016
12. Sheveleva I. V., Zemskova L. A., Voit A. V., Zhelezov S. V., Kuryavyy V. G. Relationship between electrochemical and structural properties of modified carbon fibers. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2007, vol. 80, no. 5, pp. 740—745. DOI: 10.1134/S1070427207050102
13. New carbon based materials for electrochemical energy storage systems: batteries, supercapacitors and fuel cells. Eds. by I. V. Barsukov, C. S. Johnson, J. E. Doninger, V. Z. Barsukov. Dordrecht: (Netherlands), 2006, pp. 33—41. DOI: 10.1007/1-4020-4812-2
14. Zemskova L. A., Sheveleva I. V., Barinov N. N., Kaidalova T. A., Voit A. V., Zhelezov S. V. Manganese oxide carbon fibrous materials. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2008, vol. 81, no. 7, pp. 1187—1192. DOI: 10.1134/S1070427208070124
15. Zemskova L. A. Modified carbon fibers: sorbents, electrode materials, catalysts. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 2, pp. 39—52. (In Russ.)
16. Jakubowicz J., Adamek G., Dewidar M. Titanium foam made with saccharose as a space holder. *J. Porous. Mater.*, 2013, vol. 20, pp. 1137—1141. DOI: 10.1007/s10934-013-9696-0
17. Vu D. H., Sleptsov V. V. Development of technology for electrode materials. *International Research Journal*, 2015, no. 11, pt 2, pp. 22—29. (In Russ.). DOI: 10.18454/IRJ.2015.42.095
18. Sleptsov V. V. *Fiziko-khimicheskie osnovy nanomaterialov i nanotekhnologii* [Physico-chemical fundamentals of nanomaterials and nanotechnology]. Moscow: MATI-RGTU im. K. E. Tsiolkovskogo, 2015, 196 p. (In Russ.)
19. Nesterov V. A., Kukushkin D. Yu., Kozlov A. P. Investigation of the metallization of porous materials by deposition of metal nanoclusters onto the surface by electrophoresis. *Sbornik tezisev dokladov XLIV Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Gagarinskije chteniya-2018" = Abstracts of the XLIV International Youth Scientific Conference "Gagarin Readings-2018"*. Moscow: MAI, 2018, p. 281. (In Russ.)
20. Sleptsov V. V., Savkin A. V., Kukushkin D. Yu., Ditleva A. O. Research of the deposition process of metal nanoclusters on the surface of porous materials by the electrophoresis method. *Vestnik mashinostroeniya*, 2018, no. 9, pp. 45—47. (In Russ.)
21. Goffman V. G., Gorokhovskiy A. V., Gorshkov N. V., Telagina O. S., Kovnev A. V., Orozaliev E. E., Sleptsov V. V. Impedance spectroscopy of polymer composites based on base potassium polytitanate. *Elektrokhimicheskaya Energetika = Electrochemical Energetics*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 141—148. (In Russ.)
22. Gorokhovskiy A. V., Palagin A. I., Panova L. G., Ustinova T. P., Burmistrov I. N., Aristov D. V. Manufacturing submicro-nanoscale potassium polytitanates and composite materials based on them. *Nanotekhnika*, 2009, no. 3, pp. 38—44. (In Russ.)
23. Gorokhovskiy A. V., Panova L. G., Burmistrov I. N., Ustinova T. P., Levkina N. L. Potassium polytitanates with a fibrous and scaly structure: synthesis and application. *International forum on nano-technology: collection of reports of scientific and technological sections*. Moscow: Rosnano, 2008, vol. 1, pp. 168—169. (In Russ.)

Received December 14, 2019