

УДК 661.666+661.183.2

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241219.51.601

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПОРИСТІСТЬ НАНОПОРИСТОГО ВУГЛЕЦЮ, ОТРИМАНОГО З КАРБІДУ ТИТАНУ

РОСЛИК І. Г.^{1*}, к. т. н., проф.,
ЗАГОРОДНА В. В.², аспир.,
ГОГОЦІ О. Г.³, аспир.

^{1*} Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-54-18, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

² Кафедра покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 924-63-49, e-mail: veronika@mrc.org.ua, ORCID ID: 0000-0002-8873-015X

³ Кафедра промислової теплоенергетики, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (063) 233-24-43, e-mail: alex@mrc.org.ua, ORCID ID: 0000-0002-3173-4432

Анотація. *Мета* дослідження – визначення залежності значення питомої поверхні та розподілу пор за розмірами від температури синтезу нанопористого вуглецю, одержаного з карбіду титану шляхом обробки хлором. *Методика.* Нанопористий вуглець одержували обробкою порошку карбіду титану потоком хлору на експериментальній установці проточного типу за температур від 300 до 1 200 °С. Визначення питомої поверхні та розміру пор виконували на автоматичному обладнанні (Quantachrome, США) з комп'ютерним керуванням та обробкою даних. Для цього застосовано метод Брунауера – Еммета-Теллера (БЕТ). Пористу структуру вуглецю, а саме об'єм пор та їх розподіл за розмірами, визначено на підставі функціональної теорії нелокальної щільності (NLDFT) із застосуванням програмного забезпечення, що додається до приладу. *Результати.* Експериментально встановлено, що зміна температури хлорування карбіду титану дозволяє впливати на розмір пор одержуваного вуглецю і контролювати однаковий розмір пор у вузькому діапазоні розмірів. Із підвищенням температури загальний об'єм пор і показники питомої поверхні збільшуються і досягають максимального значення за температури синтезу 1 000 °С (до 1 442 м²/г за БЕТ), при цьому зменшується кількість мікропор і підвищується мезопористість. *Наукова новизна.* Вперше з'ясовано, що шляхом зміни температури хлорування карбіду титану можна забезпечити одержання нанопористого вуглецю з контрольованим розміром пор у межах до 2 нм. *Практична значимість.* Результати дослідження можуть бути використані для розроблення технології виробництва суперконденсаторів.

Ключові слова: нанопористий вуглець; карбід титану; високотемпературне хлорування; питома поверхня; розподіл пор за розмірами

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОРИСТОСТЬ НАНОПОРИСТОГО УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ КАРБИДА ТИТАНА

РОСЛИК И. Г.^{1*}, к. т. н., проф.,
ЗАГОРОДНАЯ В. В.², аспир.,
ГОГОЦИ А. Г.³, аспир.

^{1*} Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 452-54-18, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

² Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(093) 924-63-49, e-mail: veronika@mrc.org.ua, ORCID ID: 0000-0002-8873-015X

³ Кафедра промышленной теплоэнергетики, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(063) 233-24-43, e-mail: alex@mrc.org.ua, ORCID ID: 0000-0002-3173-4432

Аннотация. *Цель* работы – определение зависимости значения удельной поверхности и распределения пор по размерам от температуры синтеза нанопористого углерода, полученного из карбида титана путем обработки хлором. *Методика.* Нанопористый углерод получен обработкой порошка карбида титана потоком хлора на экспериментальной установке проточного типа при температурах от 300 до 1 200 °С. Определение удельной поверхности и размера пор выполнено на автоматическом оборудовании (Quantachrome, США) с компьютерным управлением и обработкой данных. Для определения удельной поверхности применен метод Брунауера – Эммета–Теллера (БЭТ). Пористую структуру углерода, а именно объем пор и их распределение по размерам, определяли на основании функциональной теории нелокальной плотности (NLDFT) с

применением программного обеспечения, прилагаемого к прибору. **Результаты.** Экспериментально установлено, что изменение температуры хлорирования карбида титана позволяет влиять на размер пор получаемого углерода и контролировать одинаковый размер пор в узком диапазоне размеров. С повышением температуры общий объем пор и значение удельной поверхности увеличиваются и достигают максимального значения при температуре синтеза 1 000 °C (до 1 442 м²/г по БЭТ), при этом уменьшается количество микропор и увеличивается мезопористость. **Научная новизна.** Впервые установлено, что путем изменения температуры хлорирования карбида титана можно обеспечить получение нанопористого углерода с контролируемым размером пор в пределах до 2 нм. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы при разработке технологии производства суперконденсаторов.

Ключевые слова: нанопористый углерод; карбид титана; высокотемпературное хлорирование; удельная поверхность; распределение пор по размерам

AFFECT OF TEMPERATURES ON THE POROSITY OF NANOPOROUS CARBON DERIVED FROM TITANIUM CARBIDE

ROSLYK I.H.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,
ZAHORODNA V.V.², *PhD student*,
HOHOTSI O.G.³, *post-graduate student*

^{1*} Coatings, composite materials and metal protection department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Av., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 452-54-18, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

² Coatings, composite materials and metal protection department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Av., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (093) 924-63-49, e-mail: veronika@mrc.org.ua, ORCID ID: 0000-0002-8873-015X

³ Department of industrial power systems, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Av., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38(063) 233-24-43, e-mail: alex@mrc.org.ua, ORCID ID: 0000-0002-3173-4432

Abstract. Purpose. The research was aimed to determine the dependence of the specific surface area and pore size distribution on the synthesis temperature for nanoporous carbon obtained from titanium carbide by chlorine treatment. **Methodology.** Nanoporous carbon has been obtained by treating titanium carbide powder with a stream of chlorine in a flow-type experimental setup at temperature range from 300°C to 1 200 °C. The specific surface area and pore size have been determined using automatic equipment (Quantachrome, USA) with computer control and data processing. To determine the specific surface, the Brunauer – Emmett – Teller (BET) method has been used. The porous structure of carbon, namely the pore volume and its size distribution, has been determined on the basis of the non-local density functional theory (NLDFT) using the software which is supplied with the device. **Results.** It has been experimentally established that change of chlorination temperature at titanium carbide processing effects on the pore size of the resulting carbon and allows controlling the same pore size in a narrow size range. With increasing temperature, the total pore volume and specific surface area increase as well and reach their maximum value at a synthesis temperature of 1 000 °C (up to 1 442 м²/g according to BET), while the number of micropores decreases and mesoporosity increases. **Scientific novelty.** It has been found for the first time that due to a change in the temperature of titanium carbide chlorination it is possible to obtain nanoporous carbon with a controlled pore size up to 2 nm. **Practical significance.** The research results can be used for developing technology of supercapacitor production.

Keywords: nanoporous carbon; titanium carbide; high temperature chlorination; specific surface area; pore size distribution

Постановка проблеми

В останні роки велику зацікавленість викликають дослідження, спрямовані на отримання високопористих вуглецевих матеріалів, які мають високу загальну пористість $\approx 60\%$ та пори розміром до 10 нм. Увага до цих матеріалів пов'язана з тим, що такий нанопористий вуглець знайшов своє застосування для отримання електрохімічних конденсаторів або суперконденсаторів (іоністорів). Суперконденсатори (СК) посідають проміжне місце між акумуляторами, які здатні накопичувати високу електричну енергію, та електричними конденсаторами, здатними віддавати високу потужність протягом декількох мілісекунд. Робоча напруга більшості розроблених нині суперконденсаторів, згідно з літературними даними,

перебуває в межах 1,2...2,7 В, електрична ємність становить 5...5 000 Ф [1–2].

Основний спосіб досягнення високої ємності СК – це використання електродів із високою питомою поверхнею і електронною провідністю. В більшості випадків це різні види вуглецю, такі як активоване вугілля, нанотрубки і нанопористий вуглець. Нанопористий вуглець (НПВ) – новий тип вуглецевих матеріалів, що володіє дуже високою доступною питомою поверхнею і пористістю, чудово підходить для використання як активної речовини в електродах суперконденсаторів подвійного шару і гібридних системах. Він належить до класу каталітичних активних вуглецевих матеріалів зі структурою, менше впорядкованою, ніж графіт, але не повністю аморфною.

Елементи структури нанопористого вуглецю складають пори. Згідно із класифікацією, офіційно

прийнятою Міжнародним союзом з теоретичної та прикладної хімії (IUPAC), пори розрізняють за розміром таким чином: мікро- (< 2 нм); мезо- (2...50 нм) та макропори (> 50 нм). Розмір пор, їх класифікація за розмірами, регулярність або хаотичність розподілу в об'ємі істотно впливають на властивості суперконденсаторів. Вуглецеві матеріали для суперконденсаторів повинні мати високу пористість, розвинену питому поверхню, порядку 1 000...2 000 м²/г і контрольований розмір пор, порівняний з розмірами іонів електроліту [1; 3].

Нанопористий вуглець можна синтезувати з газоподібних, твердих та рідких матеріалів (прекурсорів). Безліч різних видів активованого вугілля отримують із рослинної сировини, наприклад, з бамбука [4], рисового лущиння [5], деревини [6], шкірки банана [7], фенольних смол [8], аерогелів [9], волокна [10–11], а також із вуглецевих нанотрубок [12; 13]. Розподіл пор за розміром і структуру вуглецю, отриманого з полімеру і природних матеріалів, важко контролювати через випадкову орієнтацію полімерних ланцюгів, їх форму і структурну неоднорідність [14].

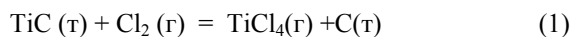
Останнім часом особлива увага направлена на використання в складі суперконденсаторів вуглецю, отриманого з карбіду металу. У зарубіжній літературі для назви такого продукту використовують термін carbide-derived carbon (CDC), який відображає спосіб одержання вуглецю [15; 16]. Порівняльний аналіз властивостей, структури і ціни вуглецевих матеріалів, отриманих із різних прекурсорів [17] показав, що саме CDC-вуглець викликає підвищений інтерес для конструкцій СК. Застосовуючи карбіди металів із різними типами і параметрами кристалічної решітки, змінюючи технологічні режими, зокрема, температуру синтезу вуглецю, можна отримувати пори різного контрольованого розміру і об'єму, тобто керувати пористістю вуглецевого продукту, що дуже важливо для властивостей суперконденсаторів [18; 19].

Мета досліджень

Мета дослідження – визначення залежності величини питомої поверхні та розподілу пор за розмірами від температури синтезу нанопористого вуглецю, отриманого з карбіду титану шляхом обробки хлором.

Методика досліджень

Нанопористий вуглець отримували шляхом обробки карбіду титану безперервним потоком хлору на експериментальній установці у печі проточного типу за температур від 300 до 1 200 °С, при цьому відбувалася реакція 1:



Карбід титану, який завантажують у горизонтальну трубчасту піч із кварцовою трубою, продувають аргоном протягом 30 хв із подальшим нагріванням до потрібної температури зі швидкістю

30 °С/хв. Після досягнення необхідної температури потік аргону зупиняють і вмикають потік хлору. Після закінчення процесу хлорування зразок охолоджують у середовищі аргону для видалення залишкових хлоридів металів. Дуже важливо, щоб у реакційному просторі був повністю відсутній кисень. Наявність кисню у реакційному просторі підвищує зольність нанопористого вуглецю, що знижує якість електродного матеріалу в суперконденсаторах. Залишки хлору в отриманому вуглеці видаляють шляхом відпалювання у середовищі водню за температури 500...600 °С згідно з реакцією:



Молекула водню завдяки малому розміру (0,25 нм) здатна видалити з мікропор матеріалу залишки хлору, діаметр молекули якого складає 0,37 нм.

Вимірювання питомої поверхні та розміру пор виконані на автоматичному адсорбційному високоточному обладнанні (Quantachrome, США) з комп'ютерним керуванням та обробкою даних. Робота приладу основана на об'ємному вимірюванні адсорбції азоту за температури 77 К. Для визначення питомої поверхні застосовували метод Брунауера – Еммета – Теллера (БЕТ), заснований на адсорбції газу – азоту.

Пористу структуру вуглецю, а саме об'єм пор та розподіл їх за розмірами, визначено за допомогою функціональної теорії нелокальної щільності (NLDFT) з використанням програмного забезпечення, що додається до приладу.

Результати досліджень

На рисунку 1 показано ізотерми адсорбції та десорбції азоту на пористому вуглеці, отриманому за різних температур синтезу.

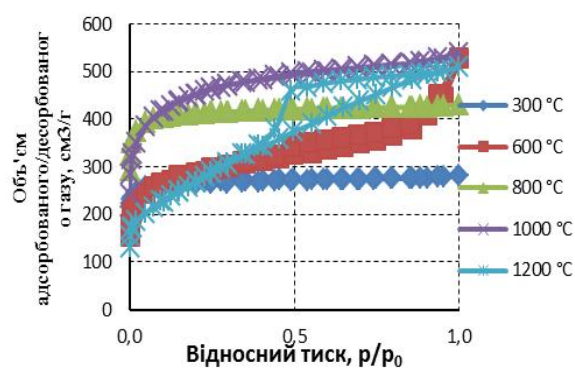


Рис. 1. Ізотерми адсорбції для пористого вуглецю, синтезованого за різних температур /

Fig. 1. Isothermy adsorption for porous vugletsu synthesized at low temperatures

Для зразків вуглецю, синтезованого за температур 300 °С, 800 °С та 1 000 °С, отримано ізотерми газової адсорбції I типу, які свідчать про наявність мікропор та відсутність мезо- та макропор. Пористий вуглець, отриманий за 600 °С, мав незначну петлю

гістерезису, в той час як для зразка, отриманого за 1 200 °С спостерігається типова ізотерма адсорбції IV типу, що свідчить про наявність мезопор. Найбільший об'єм адсорбованого азоту (520 см³/г) та найбільше значення питомої поверхні (1 442 м²/г) зафіксовано для зразка, отриманого за 1 000 °С. Значення питомої поверхні збільшується з підйомом температури з 300 до 1 000 °С, але потім дещо зменшується за температури хлорування 1 200 °С (рис. 2).

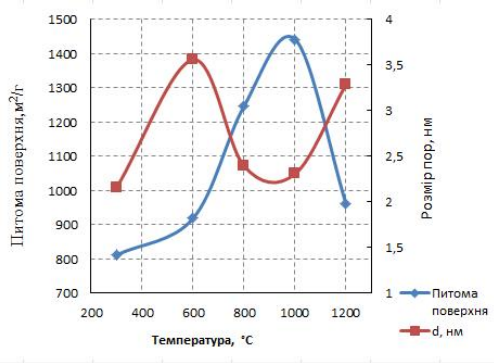


Рис. 2. Значення питомої поверхні пористого вуглецю та середнього розміру пор (d) / Fig. 2. The value of the pet surface porous vuglets and the middle pores (d)

Результати вимірювання середнього розміру пор (рис. 2) та розподілу пор за розміром (рис. 3) також

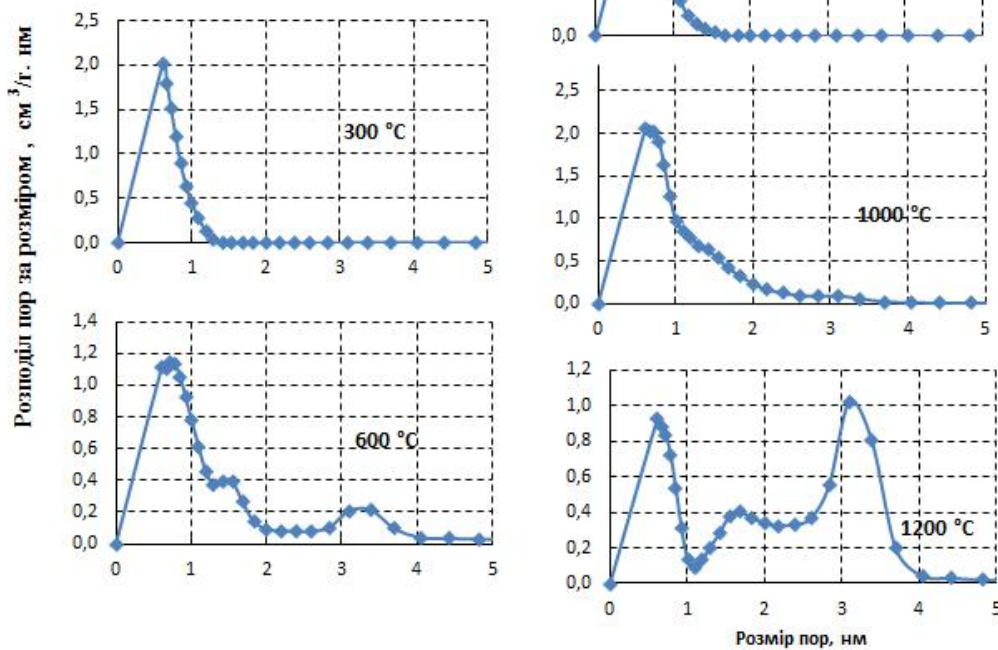


Рис. 3. Розподіл пор за розміром / Fig. 3. Rospodil then for Rosmir

підтверджують той факт, що за температур 600 °С та 1 200 °С утворюються пори розміром понад 2 нм. Аналіз кривих розподілу пор за розмірами (рис. 3) показує, що за температури 600 °С, а особливо за температури 1 200 °С, розмір пор змінюється від 0,5 до 5 нм, тобто спостерігається більш широкий діапазон розміру пор. За 300, 800 та 1 000 °С спостерігається більш вузький розподіл пор у межах до 2 нм.

Високі значення питомої поверхні (рис. 2) та об'ємної пористості характерні для вуглецю, отриманого під час температурного хлорування карбідів металів. Карбід титану TiC має кубічну гранецентровану решітку типу NaCl з співвідношенням радіусів $r_C/r_{Ti} = 0,526$. Залежно від умісту вуглецю період решітки складає: 4,296 Å (C 32 ат. %) та 4,326 Å (C 48,9 ат. %). [21]. Теоретичний об'єм пор вуглецю, отриманого з карбиду титану, можна визначити таким чином:

$$V_{\text{пор}} = \frac{1}{\rho_{\text{НПВ}}} - \frac{1}{\rho_C} \quad (3)$$

де ρ_C – щільність графіту, приймаємо значення 2,24 г/см³. Щільність НПВ розраховуємо так:

$$\rho_{\text{НПВ}} = \frac{n \cdot (M_C)}{M_{\text{TiC}}} \cdot \rho_{\text{TiC}} \quad (4)$$

де n – кількість атомів вуглецю в карбіді TiC, дорівнює 1, M_C та M_{TiC} – молекулярна вага вуглецю та карбиду титану відповідно, ρ_{TiC} – щільність карбиду титану. За розрахунком об'єм пор складає 55 %.

Під час реакції (1) газоподібний хлор взаємодіє з атомами Ті, розмір якого 1,467 нм, видаляє його з решітки карбиду, утворюючи газоподібний продукт. Хлорид титану за температури реакції, яка значно перевищує температуру його кипіння (136,4 °С), видаляється з решітки, залишаючи пористий вуглець. Із підвищенням температури підвищується рухливість атомів та збільшується загальна пористість.

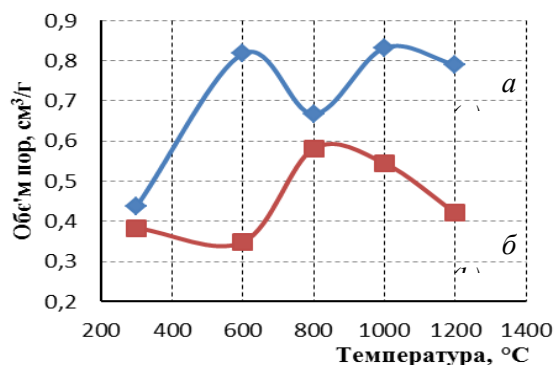


Рис. 4. Значення об'єму пор: а – загальний об'єм пор, б – об'єм мікропор / Fig. 4. Significance of the time: а – zagalniy of the time, b – of the mikropor

На рисунку 4 наведено результати впливу температури на загальний об'єм пор та об'єм

мікропор. З підвищенням температури до 1 000 °С загальний об'єм пор зростає і дещо зменшується за 1 200 °С. При цьому об'єм мікропор зменшується. Зазначимо, що максимальний об'єм мікропор (рис. 4) та мінімальний середній розмір пор (рис. 2) спостерігаються за температур синтезу 800...1 000 °С.

Висновки

1. Високотемпературне хлорування карбиду титану дозволяє отримати нанопористий вуглецевий матеріал із високою питомою поверхнею та нанорозмірними порами.

2. Змінюючи температуру хлорування карбиду титану можна впливати на розмір пор вуглецю і контролювати однаковий розмір пор у вузькому діапазоні розмірів. З підвищенням температури загальний об'єм пор збільшується і досягає максимального значення за температури синтезу 1 000 °С. Підвищення температури хлорування зумовлює утворення мезопор, в той же час як мікропористість зменшується.

3. Питома поверхня нанопористого вуглецю за зростання температури від 300 до 1 000 °С збільшується і досягає максимуму (до 1 442 м²/г по BET) за температури 1 000 °С. У разі подальшого підвищення температури до 1 200 °С значення питомої поверхні зменшується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Simon P. Capacitive energy storage in nanostructured carbon – electrolyte systems / P. Simon, Y. Gogotsi // Accounts of chemical research. – 2012. – Vol. 46. – № 5. – Pp. 1094–1103.
- Шурыгина В. Суперконденсаторы размеры меньше, мощность выше / В. Шурыгина // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 7. – С. 11–20.
- Ania C. O. Solvent-free ionic liquids as in situ probes for assessing the effect of ion size on the performance of electrical double layer capacitors / C. O. Ania, J. Pernak, F. Stefaniak, E. Raymundo-Pinero, F. Beguin // Carbon. – 2006. – Vol. 44. – Pp. 3113–3139.
- Kim Y. T. Preparation and characterization of bamboo-based activated carbons as electrode materials for electri double layer capacitors / Y. T. Kim, B. J. Lee, H. Suezaki, T. Chino, Y. Abe // Carbon. – 2006. – Vol. 44. – Pp. 581–616.
- Guo Y. Performance of electrical double layer capacitors with porous carbon derived from rice husk / Y. Guo, J. Qi, Y. X. Jiang, S. Yang, S. Wang, H. U. A. Xu // Materials Chemistry & Physics. – 2003. – Vol. 80. – Pp. 704–09.
- Wu F.-C. Physical and electrochemical characterization of activated carbons prepared from firwoods for supercapacitors / F.-C. Wu, R.-L. Tseng, C.-C. Hu, C.-C. Wang // Journal of Power Sources. – 2004. – Vol. 138. – Pp. 351–359.
- Ковалюк З. Д. Пористий вуглецевий матеріал з рослинної сировини як поляризційна складова електродів суперконденсаторів / З. Д. Ковалюк, С. П. Юрченко, І. І. Семенчук // Журнал нано- та електронної фізики. – 2015. – Т. 7. – № 2. – С. 12–17.
- Endo M. Morphology and organic edlc applications of chemically activated Ar-resin-based carbons / M. Endo, T. Maeda, Y. J. Kim, M. S. Dresselhaus, H. Ohta, T. Inoue, T. Hayashi, Y. Nishimura // Carbon. – 2002. – Vol. 40. – Pp. 2613–2626.
- Yang K. L. Electrosorption capacitance of nanostructured carbon aerogel obtained by cyclic voltammetry / K. L. Yang, S. Yiacoumi, C. Tsouris // Journal of Electronal Chemistry. – 2003. – Vol. 540. – Pp. 159–167.
- Adhyapak P. V. Application of electrochemically prepared carbon nanofibers in supercapacitors / P. V. Adhyapak, T. Maddanimath, S. Pethkar // Journal of Power Sources. – 2002. – Vol. 109. – Pp. 105–110.
- Huang C. H. Textural and electrochemical characterization of porous carbon nanofibers as electrodes for supercapacitors / C. H. Huang, Y. P. Wu, C. C. Hu, Y. Li // Journal of Power Sources. – 2007. – Vol. 172. – Pp. 460–467.
- Chen J. H. Electrochemical characterization of carbon nanotubes as electrode in electrochemical double-layer capacitors / J. H. Chen, W. Z. Li, D. Z. Wang, S. X. Yang, J. G. Wen, Z. F. Ren // Carbon. – 2002. – Vol. 40. – Pp. 1193–1197.
- Zhao X. Z. X. The role of nanomaterials in redox-based supercapacitors for next generation energy storage devices / X. Z. X. Zhao, B. M. Sanchez, P. J. Dobson, P. S. Grant // Nanoscale. – 2011. – Vol. 3 (3). – Pp. 839–855.
- Presser V. Carbide-Derived Carbons – From Porous Networks to Nanotubes and Graphene Adv. / V. Presser, M. Heon, Yu. Gogotsi // Funct. Mater. – 2011. – Vol. 21. – Pp. 810–833. – Режим доступу : DOI: 10.1002/adfm.201002094

15. Nikitin A. Nanostructured carbide derived carbon, in Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology / A. Nikitin, Y. Gogotsi. – American Scientific Publishers: Stevenson Ranch, CA, 2003. – Pp. 553–574.
16. Simon P. Capacitive energy storage in nanostructured carbon–electrolyte systems / P. Simon, Y. Gogotsi // Accounts of chemical research. – 2012. – Vol. 46. – № 5. – Pp. 1094–1103.
17. Gogotsi Y. Nanoporous carbide-derived carbon with tunable pore size / Y. Gogotsi, A. Nikitin, H. Ye, W. Zhou, J. E. Fischer, B. Yi, H. C. Foley, M. W. Barsoum // Nat. Mater. – 2003. – Vol. 2. – Pp. 591–594.
18. Kravchik A. E. Structure of nanoporous carbon produced from boron carbide / A. E. Kravchik, Ju. A. Kukushkina, V. V. Sokolov et al. // Carbon. – 2006. – Vol. 44. – Pp. 3263 – 3268.
19. Адсорбция, удельная поверхность, пористость : монография / [С. Грег, К. Синг]. – 2-е изд. – Москва : Мир, 1984. – 145 с.

REFERENCES

1. Simon P. and Gogotsi Y. Capacitive energy storage in nanostructured carbon-electrolyte systems. Accounts of chemical research. 2012, vol. 46, no. 5, pp. 1094–1103.
2. Shurygina V. *Razmery superkondensatorov men'she, moshchnost' vyshe* [Supercapacitors sizes are smaller, power is higher]. Electronics : Science, Technology, Business, 2009, no. 7, pp. 11–20 (in Russian).
3. Ania C.O., Pernak J., Stefaniak F., Raymundo-Pinero E. and Beguin F. Solvent-free ionic liquids as in situ probes for assessing the effect of ion size on the performance of electrical double layer capacitors. Carbon, 2006, vol. 44, pp. 3113–3139.
4. Kim Y.T., Lee B.J., Suezaki H., Chino T. and Abe Y. Preparation and characterization of bamboo-based activated carbons as electrode materials for electric double layer capacitors. Carbon, 2006, vol. 44, pp. 581–616.
5. Guo Y., Qi J., Jiang Y.X., Yang S., Wang Z. and Xu H.U.A. Performance of electrical double layer capacitors with porous carbons derived from rice husk. Materials Chemistry & Physics, 2003, vol. 80, pp. 704–709.
6. Wu F.C., Tseng R.L., Hu C.C. and Wang C.C. Physical and electrochemical characterization of activated carbons prepared from firwoods for supercapacitors. J. Power Sources, 2004, vol. 138, pp. 351–359.
7. Kovalyuk, Z.D., Yurtsenko S.P. and Semenchuk I.I. *Poristy uglerodnyy material iz rastitel'nogo syr'ya kak polarizuyushchiy komponent elektrodov superkondensatorov* [Porous carbon material from plant raw materials as a polarizing component of electrodes of supercapacitors]. Zhurnal nano- i elektronnoy fiziki [Journal of Nano- and Electron Physics]. Vol 7, no. 2, 2015, pp. 12–17. (in Russian).
8. Endo M., Maeda T., Kim Y.J., Dresselhaus M.S., Ohta H., Inoue T., Hayashi T. and Nishimura Y. Morphology and organic edlc applications of chemically activated Ar-resin-based carbons. Carbon, 2002, vol. 40, pp. 2613–2626.
9. Yang K.L., Yiacoumi S. and Tsouris C. Electro sorption capacitance of nanostructured carbon aerogel obtained by cyclic voltammetry. J. Electroanal. Chem., 2003, vol. 540, pp. 159–167.
10. Adhyapak P.V., Maddanimath T. and Pethkar S. Application of electrochemically prepared carbon nanofibers in supercapacitors. J. Power Sources, 2002, vol. 109, pp. 105–110.
11. Huang C.H., Wu Y.P., Hu C.C. and Li Y. Textural and electrochemical characterization of porous carbon nanofibers as electrodes for supercapacitors. J. Power Sources, 2007, vol. 172, pp. 460–467.
12. Chen J.H., Li W.Z., Wang D.Z., Yang S.X., Wen J.G. and Ren Z.F. Electrochemical characterization of carbon nanotubes as electrode in electrochemical double-layer capacitors. Carbon, 2002, vol. 40, pp. 1193–1197.
13. Zhao X.Z.X., Sanchez B.M., Dobson P.J. and Grant P.S. The role of nanomaterials in redox-based supercapacitors for next generation energy storage devices. Nanoscale, 2011, vol. 3 (3), pp. 839–855.
14. Presser V., Heon M. and Gogotsi Yu. Carbide-Derived Carbons – From Porous Networks to Nanotubes and Graphene Adv. Funct. Mater. 2011, vol. 21, pp. 810–833.
15. Nikitin A. and Gogotsi Y. Nanostructured carbide derived carbon, in Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. American Scientific Publishers : Stevenson Ranch CA., 2003, pp. 553–574.
16. Simon P. and Gogotsi Y. Capacitive energy storage in nanostructured carbon-electrolyte systems. Accounts of chemical research. 2012, vol. 46, no. 5, pp. 1094–1103.
17. Gogotsi, Y., Nikitin A., Ye H., Zhou W., Fischer J.E., Yi B., Foley H.C. and Barsoum M.W. Nanoporous carbide-derived carbon with tunable pore size. Nat. Mater. 2003, vol. 2, pp. 591–594.
18. Kravchik A.E., Kukushkina Ju.A., Sokolov V.V. et al. Structure of nanoporous carbon produced from boron carbide. Carbon. 2006, vol. 44, pp. 3263–3268.
19. Gregg S. and Sing K. Adsorption, specific surface area, porosity. Moscow : World Publ., 1984, 145 p. (in Russian).

Надійшла до редакції 23.11.2019.