

УДК 661.666

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-49-56

Особенности пористой структуры углеродных материалов с развитой поверхностью

© 2022 г. В.А. Горина, Е.Г. Чеблакова

АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита»
(АО «НИИграфит»), г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 13.05.21 г., доработана 12.07.21 г., подписана в печать 14.07.21 г.

Аннотация: Приведен общий обзор способов получения и областей применения углеродных материалов с большой удельной поверхностью. В качестве объектов для исследования были взяты следующие материалы: гранулированный активированный уголь марки СК-АГ-3 (производства ОАО «Сорбенты Кузбасса»); активированное целлюлозное волокно (Красноярский завод химических волокон), прошедшее карбонизацию и графитацию, подвергнутое газофазной активации при температуре 900 °С в токе диоксида углерода; ткань углеродная марки «Бусофит-Т» (ОАО «СветлогорскХимволокно»); терморасширенный фторированный графит (ОАО «Сибирский химический комбинат»). Проведены исследования пористой структуры этих материалов волюмометрическим методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе ASAP 2020. Изотермы адсорбции–десорбции азота фиксировали в интервале относительных давлений $p/p_0 = 0,05 \div 1,0$ при температуре 77 К. Величину удельной поверхности оценивали методом БЭТ исходя из изотермы адсорбции при $p/p_0 = 0,05 \div 0,30$. Для активированного угля, активированных углеродных волокон, ткани «Бусофит-Т» и терморасширенного графита удельная поверхность составила соответственно 485, 1241, 1156 и 290,5 м²/г. Объем мезопор и их распределение по размерам рассчитывали по методу Баррета, Джойнера и Халенды (BJH) в интервале давлений $p/p_0 = 0,35 \div 0,95$, а объем микропор и их распределение по размерам – методом Хорвата–Кавазое по изотерме адсорбции–десорбции азота в диапазоне $p/p_0 = 0,00 \div 0,01$. Данными методами также определен средний диаметр мезопор и микропор. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Прослежена связь между внутренним строением исследованных материалов и характеристиками пористой структуры. Показано, что активированный уголь, волокна и углеродная ткань являются микропористыми материалами, а терморасширенный графит обладает мезопористой структурой.

Ключевые слова: активированный уголь, углеродное волокно, углеродная ткань, терморасширенный графит, удельная поверхность, пористая структура, микропоры, мезопоры.

Горина В.А. – науч. сотр. Испытательного центра АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита» (АО «НИИграфит») (111524, г. Москва, Электродная ул., 2).
E-mail: labchim76@yandex.ru.

Чеблакова Е.Г. – канд. техн. наук, начальник Испытательного центра АО «НИИграфит».
E-mail: elcheblakova@yandex.ru.

Для цитирования: Горина В.А., Чеблакова Е.Г. Особенности пористой структуры углеродных материалов с развитой поверхностью. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2022. Т. 16. No. 1. С. 49–56.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-49-56.

Porous structure features of carbon materials with extended-surface

V.A. Gorina, E.G. Cheblakova

JS «Research Institute of Graphite-Based Structural Materials» (JS «NIIgraphit»), Moscow, Russia

Received 13.05.2021, revised 12.07.2021, accepted for publication 14.07.2021

Abstract: The article provides a general overview of the production methods and applications of carbon materials with a large specific surface area. The following materials were taken as objects for the study: SK-AG-3 granular activated carbon produced by OJSC «Sorbents of Kuzbass», Kemerovo, activated cellulose fiber produced by the Krasnoyarsk Chemical Fiber Plant after carbonation, graphitization, and gas-phase activation at 900 °C in carbon dioxide current, Busofit-T carbon fabric produced by OJSC «SvetlogorskKhimvolokno», thermally expanded fluorinated graphite produced by OJSC «Siberian Chemical Combine». The porous structure of these materials was investigated by low-temperature volumetric nitrogen adsorption at the ASAP 2020 unit. Nitrogen adsorption-desorption isotherms were recorded in a relative pressure range of $p/p_0 = 0.05 \div 1.0$ at 77 K. The specific sur-

face area was estimated by the BET method based on the adsorption isotherm at $p/p_0 = 0.05 \div 0.30$. The specific surface area was 485, 1241, 1156 and 290.5 m^2/g for activated carbon, activated carbon fibers, Busofit-T fabric and thermally expanded graphite, respectively. The volume of mesopores and their size distribution were calculated by the Barrett-Joyner-Halenda (BJH) method in a pressure range of $p/p_0 = 0.35 \div 0.95$. The volume of micropores and their size distribution were calculated by the Horvath-Kawazoe method using the nitrogen adsorption-desorption isotherm in a relative pressure range of $p/p_0 = 0.00 \div 0.01$. These methods were also used to determine the average diameter of mesopores and micropores. A comparative analysis of the results obtained was carried out. A relationship between the internal structure of the investigated materials and the porous structure properties was traced. It was shown that activated carbon, fibers, and carbon fabrics are microporous materials, and thermally expanded graphite has a mesoporous structure.

Keywords: activated carbon, carbon fiber, carbon fabric, thermally expanded graphite, specific surface area, porous structure, micropores, mesopores.

Gorina V.A. – researcher of the Testing Centre JS «Research Institute of Graphite-Based Structural Materials» (JS «Nilgraphit») (111524, Russia, Moscow, Elektrodnyaya str., 2). E-mail: labchim76@yandex.ru.

Cheblakova E.G. – Cand. Sci. (Eng.), superior of Testing Centre JS «Nilgraphit». E-mail: elcheblakova@yandex.ru.

For citation: Gorina V.A., Cheblakova E.G. Porous structure features of carbon materials with extended-surface. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 1. P. 49–56 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-49-56.

Введение

Углерод образует обширную группу материалов, как природных, так и искусственно созданных, включающую графиты, алмазы, сажи, коксы, ядерные графиты, активированные угли и материалы с молекулярно-ситовыми свойствами, пироуглерод, углеродные волокна и композиты, терморасширенные графиты, стеклоуглерод, фуллерены и нанотрубки. Все эти материалы, хотя и являются однокомпонентными системами, состоящими из углерода, обладают разными свойствами, которые и обуславливают различные области их применения.

Одной из групп углеродных материалов, широко используемых в промышленности и медицине, являются материалы с развитой поверхностью. В первую очередь это активированные угли (АУ), давно и успешно применяемые в качестве адсорбентов. Адсорбция с использованием активированных углей представляет интерес во многих областях — таких, как пищевая, фармацевтическая, химическая, нефтяная, атомная и автомобильная промышленности. Из-за высокой степени микропористости и поверхностной активности активированные угли применяются в таких процессах, как очистка газов и разделение различных смесей [1]. Также, благодаря своим адсорбционным свойствам, широко востребованы и активированные углеродные волокна (АУВ) [2]. Они могут быть изготовлены с очень большой площадью поверхности (до 2000 $\text{m}^2/\text{г}$) и малым диаметром волокна (обычно 10–20 мкм), что обеспечивает быстрое

протекание процессов адсорбции или каталитических процессов. Из-за высокой химической стойкости АУВ и углеродные ткани используют для фильтрации агрессивных сред, очистки технологических газов и жидкостей, выделения из последних ценных компонентов, изготовления защитных костюмов и средств индивидуальной защиты органов дыхания [3, 4]. Кроме того, АУВ и углеродные ткани с успехом применяют в медицине в виде повязок, тампонов и дренажей при лечении открытых ран и ожогов (в том числе и химических); для очистки крови и других биологических жидкостей [5]. АУВ используют также в накопителях электроэнергии, аккумуляторах, батареях, где требуются новые, в частности, токопроводящие углеродные волокна-сорбенты.

Еще один известный материал, также обладающий большой удельной поверхностью, — это терморасширенный графит (ТРГ) [6]. Как и природный графит, ТРГ химически инертен, а его электропроводность и теплопроводность определяются пористой структурой материала и могут варьироваться в широких пределах. В настоящее время большую часть производимого ТРГ перерабатывают в гибкую графитовую фольгу и прессованные изделия. Спектр применения фольги и прессованных изделий из ТРГ чрезвычайно широк. Благодаря высокой инертности к агрессивным средам, термостабильности в сочетании с упругостью и пластичностью, углеродные материалы на основе ТРГ вытесняют традиционные

уплотнительные и прокладочные материалы в химическом, нефтегазовом машиностроении, в топливно-энергетическом комплексе, коммунальном хозяйстве.

Важными характеристиками для всех перечисленных материалов являются величина удельной поверхности, распределение пор по размерам, относительный объем мезо- и микропор. Разумеется, подобные данные присутствуют в литературе, но нам кажется интересным объединить эти сведения в одной статье, показать схожесть и различия в пористой структуре этих углеродных материалов.

Экспериментальная часть

В качестве объектов для исследования были взяты следующие материалы: гранулированный активированный уголь марки СК-АГ-3 (производства ОАО «Сорбенты Кузбасса», г. Кемерово), активированное целлюлозное волокно, ткань углеродная марки «Бусофит-Т» (ОАО «Светлогорск-Химволокно», Беларусь), терморасширенный фторированный графит (ТРФГ) (ОАО «Сибирский химический комбинат», г. Северск).

Немного остановимся на особенностях получения этих материалов. Упрощенно процесс получения активированного угля можно свести к двум стадиям: карбонизация и активация [7, 8]. На первой стадии исходное сырье, в данном случае коксовая пыль, подвергается термической обработке без доступа воздуха. Получается достаточно прочный, но крупнопористый материал, который подвергается активации для получения развитой микропористой структуры [9]. Активация заключается в окислении карбонизата водяным паром при температуре от 800 до 1000 °С с использованием специального оборудования.

Для получения АУВ волокно на основе гидратцеллюлозы (вискозы), производства Красноярского завода химических волокон, прошедшее карбонизацию и графитацию с конечной температурой обработки 1600 °С, было подвергнуто газофазной активации при $t = 900$ °С в токе диоксида углерода в течение 50 мин [10, 11].

Ткань углеродная марки «Бусофит-Т» произведена на основе ткани из вискозной технической нити, которая была подвергнута карбонизации, а затем активации водяным паром при $t = 850 \div 950$ °С, что намного увеличивает ее удельную поверхность и позволяет применять ее в качестве сорбционно-фильтрующего материала [3, 4].

Общий принцип, заложенный в основу различных методов получения ТРГ, заключается во внедрении в межслоевые пространства графита веществ или соединений, которые при быстром нагреве либо сами переходят в газообразное состояние, либо продукты их распада являются газами [6, 12]. При получении данного ТРГ была проведена обработка графитсодержащего материала фторгалогенидом для получения интеркалированного соединения фторированного графита (ИСФГ). Затем его быстро нагрели до $t = 500$ °С, при термударе произошло термическое разложение ИСФГ с образованием расширенного графита в виде ваты с увеличением пористости и объема графитового материала в 1000 раз.

Для изучения характеристик этих пористых материалов был использован волюмометрический метод, основанный на физической адсорбции газов, в частности азота.

Удельную поверхность и пористую структуру образцов определяли по низкотемпературной адсорбции азота на приборе ASAP 2020 (фирма «Micromeritics», США). Изотермы адсорбции—десорбции азота фиксировали в интервале относительных давлений $p/p_0 = 0,05 \div 1,0$ при температуре 77 К. Образцы предварительно проходили дегазацию при $t = 200$ °С под вакуумом в течение не менее 2 ч.

Величину удельной поверхности оценивали методом БЭТ, исходя из изотермы адсорбции при $p/p_0 = 0,05 \div 0,30$. Объем мезопор и их распределение по размерам рассчитывали по методу Баррета, Джойнера и Халенды (ВЖН) [13] в интервале давлений $p/p_0 = 0,35 \div 0,95$. Объем микропор и их распределение по размерам рассчитывали методом Хорвата—Кавазое [14] по изотерме адсорбции—десорбции азота в интервале относительных давлений $p/p_0 = 0,00 \div 0,01$.

Исследование структуры поверхности УВ проводили на сканирующем электронном микроскопе ТМ-3000 (Hitachi, Япония) при увеличении в 5000 раз. Фотографии для АУ и ТРГФ взяты из открытых источников.

Результаты и их обсуждение

Априори было известно, что исследуемые материалы обладают большой удельной поверхностью, и, поскольку их химический состав практически идентичен, можно было предположить, что характеристики пористой структуры для них будут

похожими. Действительно, изотермы адсорбции азота для АУ, АУВ и углеродной ткани «Бусофит» имеют вид (рис. 1), характерный для физической адсорбции микропористыми телами (1-й тип изотермы по классификации, предложенной С. Брунауэром, Л. Демингом, У. Демингом и Э. Теллером (БДДТ)) [15], и отличаются друг от друга количеством адсорбированного вещества. На изотермах наблюдаются крутой подъем при низких относительных давлениях (менее 0,03) и наличие почти горизонтального плато, свидетельствующего о заполнении микропор адсорбатом. Но совсем другой вид изотермы показывает адсорбция азота на ТРФГ. Она относится к 4-му типу вышеуказанной классификации и скорее характерна для мезопористых тел. На адсорбционной ветви наблюдается медленный рост значений удельной сорбции ($V_{\text{адс}}$) с увеличением относительного показателя p/p_0 , а в области давлений азота, близких к давлению насыщения, адсорбция резко возрастает. Петля гистерезиса указывает на наличие мезопор

(поры размером 20–500 Å), в которых происходит необратимая капиллярная конденсация [16]. В рассматриваемой изотерме петля гистерезиса соответствует типу В и характерна для материалов с щелевидной формой пор. Числовые данные представлены в табл. 1.

На рис. 2 показано распределение мезопор по размерам для исследованных материалов. Заметно, что максимумы на кривых распределения для АУ, АУВ и ткани «Бусофит» смещены в сторону пор меньшего диаметра (рис. 2, а), тогда как распределение мезопор для ТРФГ более однородно и показывает большое содержание пор размером более 100 Å (рис. 2, б).

На рис. 3 представлено распределение микропор по размерам. При этом только ультрамикропоры (эффективный диаметр которых допускает размещение всего 2–3 молекул N_2) рассматриваются как «истинные микропоры» [1, 17, 18]. В нашем случае можно говорить о том, что мы имеем дело именно с ультрамикропорами и, следова-

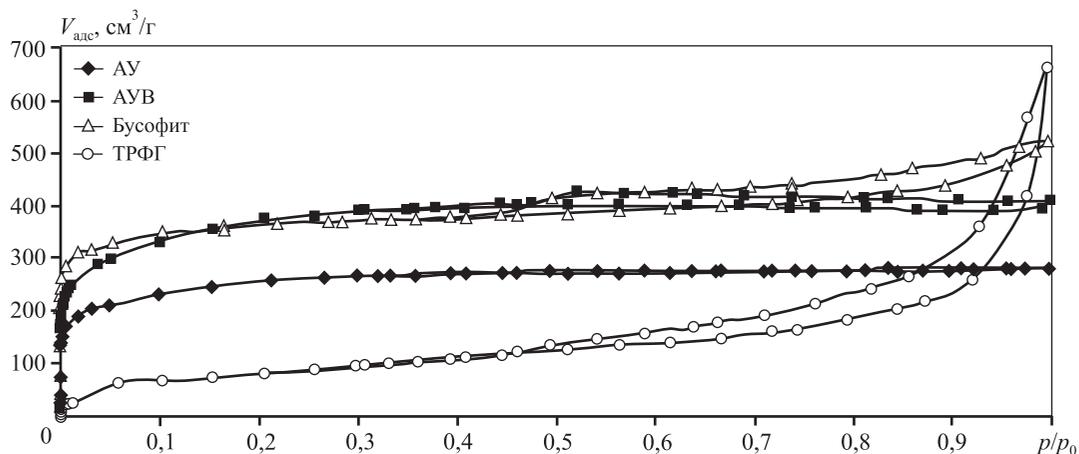


Рис. 1. Изотермы адсорбции–десорбции азота

Fig. 1. Nitrogen adsorption-desorption isotherms

Таблица 1. Удельная поверхность и удельная адсорбция

Table 1. Specific surface area and specific adsorption

Материал	Удельная адсорбции азота, cm^3/g , при p/p_0				Удельная поверхность, m^2/g
	0,10	0,30	0,80	0,99	
АУ	231,28	266,19	277,25	282,90	485
АУВ	333,24	391,08	394,22	409,82	1241
«Бусофит»	346,12	372,46	416,52	524,66	1156
ТРФГ	71,26	98,40	184,81	664,54	290

тельно, можем применить объемную модель заполнения в последующих расчетах [14, 19]. Кривые распределения имеют четкие максимумы, соответствующие наличию в материалах групп пор одного размера.

В табл. 2 приведены числовые значения характеристик пористой структуры.

Доля микропор в общем объеме пор для активированного угля и активированного углеродного волокна составляет порядка 77–80 %, для ткани «Бусофит» — 51 %, тогда как для ТРФГ — всего 7 %. Такие существенные различия в данных объясняются особенностями строения рассмотренных материалов. В АУ микропоры составляют наиболь-

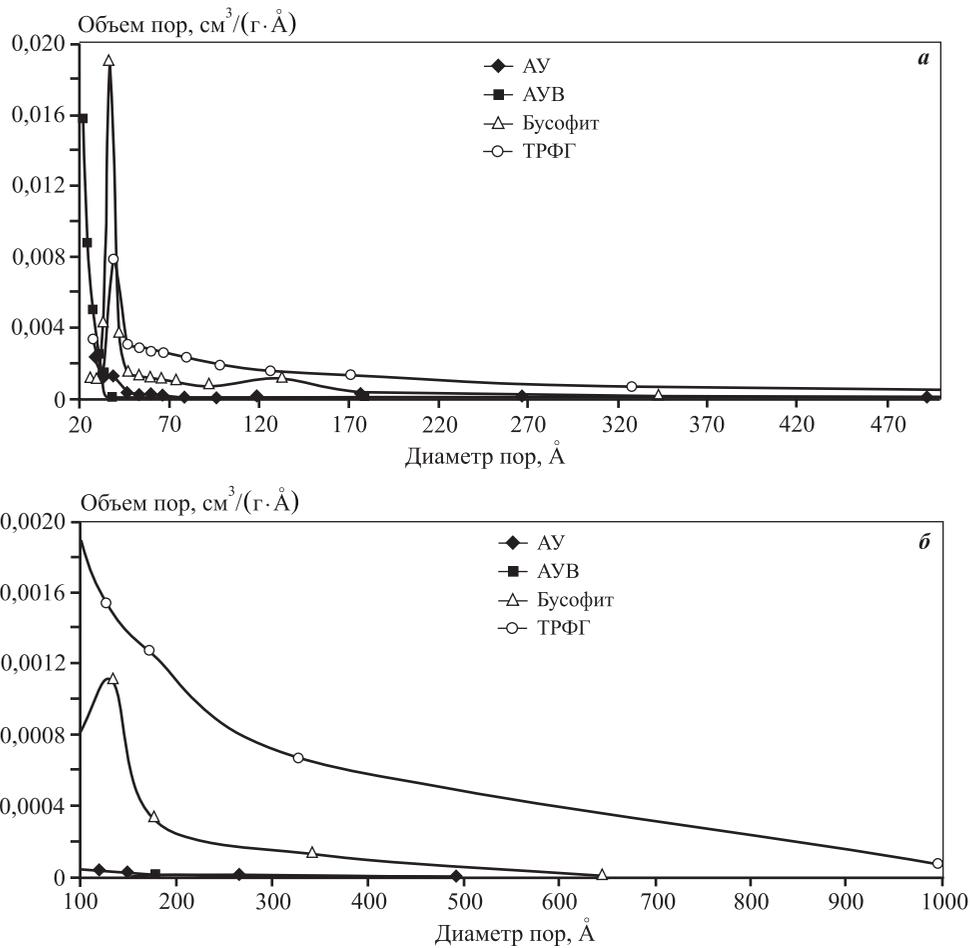


Рис. 2. Распределение мезопор по размерам

Fig. 2. Size distribution of mesopores

Таблица 2. Характеристики пористой структуры

Table 2. Porous structure properties

Материал	Суммарный объем мезо- и микропор менее 900 Å, см³/г	Средний диаметр мезопор, Å	Общий объем микропор менее 20 Å, см³/г	Средний диаметр микропор, Å
АУ	0,261	32	0,201	3,60
АУВ	0,829	33	0,805	6,65
«Бусофит»	0,782	64	0,404	3,34
ТРФГ	0,620	83	0,044	3,55

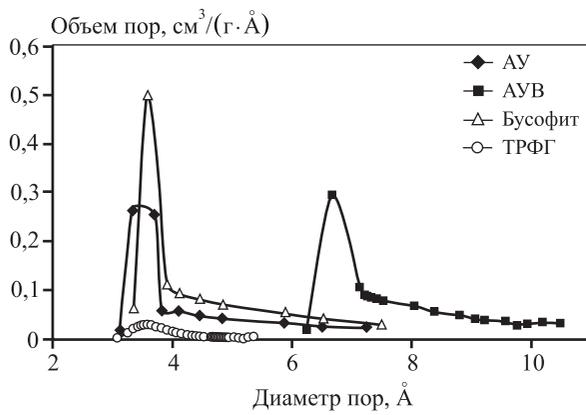


Рис. 3. Распределение микропор по размерам
Fig. 3. Size distribution of micropores

шую часть поверхности (рис. 4, *a*), внося наибольший вклад в адсорбционные свойства АУ. Определяющее влияние на структуру пор АУ оказывает исходное сырье, из которого их получают [20, 21]. Благодаря упорядоченности структуры АУВ в единице объема, в их активированных формах содержится большое количество мезо- и микропор. Углеродным волокном и углеродной ткани свойственна сложная структурная организация (рис. 4, *б*, *в*), включающая в себя фибриллы, состоящие из нескольких пачек слоев, а также специфические вытянутые поры межфибриллярного пространства длиной 200–300 Å и диаметром 10–20 Å, и все они ориентированы вдоль оси волокна [22, 23]. Кроме того, УВ и «Бусофит» активирова-

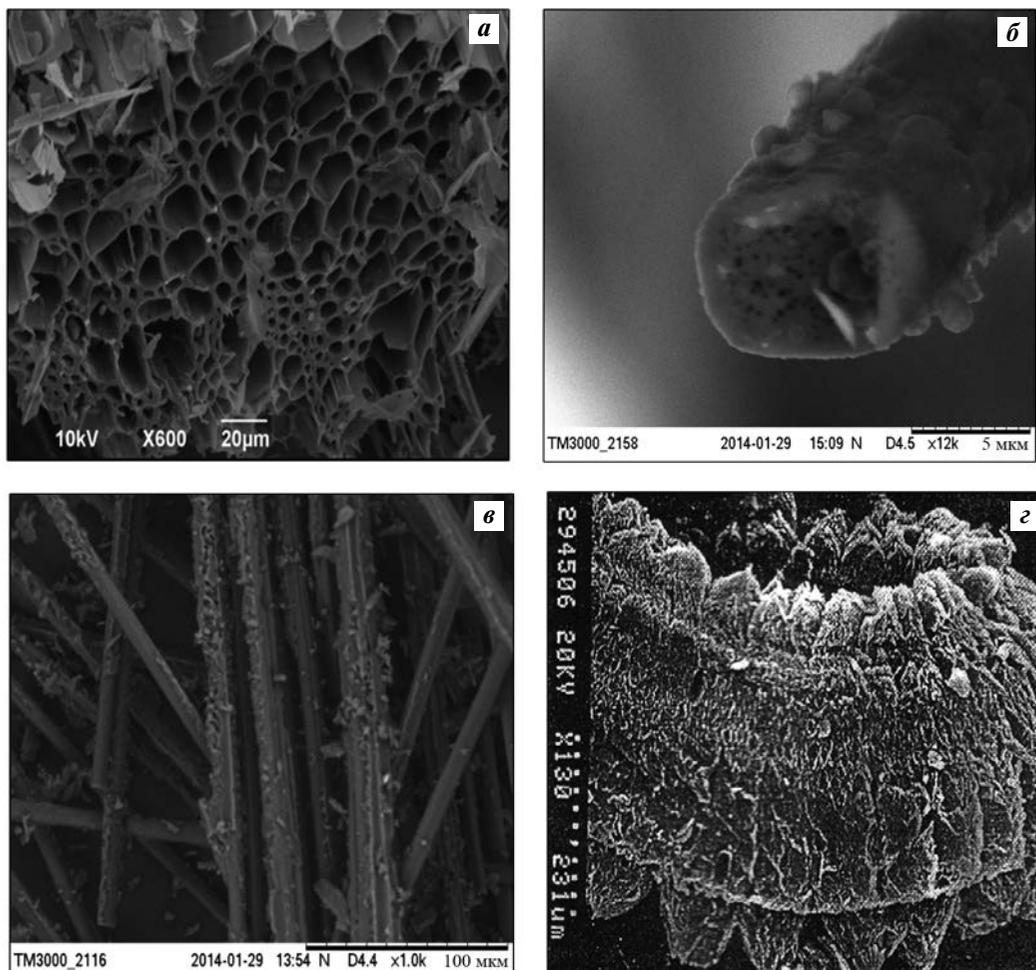


Рис. 4. Структура углеродных материалов

a – активированный уголь [7]; *б* – активированное углеродное волокно; *в* – углеродная ткань «Бусофит»; *г* – терморасширенный графит [20]

Fig. 4. Structure of carbon materials

a – activated carbon [7]; *б* – activated carbon fiber; *в* – BusoFit carbon fabric; *г* – thermally expanded graphite [20]

ны, а активация значительно увеличивает количество микропор [24–27].

Строение ТРФГ определяется способом его получения. Согласно [12], первоначально происходит расщепление кристаллитов на тонкие пачки-ленты из небольшого числа атомных плоскостей с одновременной их деформацией, в результате чего образуется объемная складчатая структура (рис. 4, з). Возникающие при этом червеобразные и цилиндрические формы частиц представляют собой закрытую поверхность, внутри которой могут содержаться остаточные продукты разложения. В ТРГ выделяют следующие виды пористости: межчастичную пористость — пористое пространство между изогнутыми «червячками» — и пористость между разориентированными пластинами углерода [6, 28]. Результаты наших исследований показывают, что, несмотря на большую удельную поверхность, в структуре ТРФГ преобладают мезопоры.

Выводы

В результате сравнительных исследований пористой структуры углеродных материалов (АУ, АУВ, ткани «Бусофит» и ТРФГ) было установлено следующее:

1. Все исследованные материалы обладают большой удельной поверхностью и сложной пористой структурой.

2. Для активированного угля, активированного волокна и углеродной ткани «Бусофит» наибольший вклад в значение измеряемой удельной поверхности вносят микропоры, имеющие высокое соотношение удельной поверхности и объема.

3. Во внутренней структуре терморасширенного фторированного графита, несмотря на его большую удельную поверхность, преобладают мезопоры.

4. Особенности внутреннего строения углеродных материалов, а также способы их получения оказывают определяющее влияние на характеристики пористой структуры.

Литература/References

1. Фенелонов В.Б. Пористый углерод. Новосибирск: ИК СО РАН, 1995.
Fenelonov V.B. The porous carbon. Novosibirsk: IK SO RAN, 1995 (In Russ.).
2. Phan N.H., Rio S., Faur C., Coq L.L., Cloirec P.L., Nguyen T.H. Production of fibrous activated carbons from natural (jute, coconut) fibers for water treatment applications. *Carbon*. 2006. Vol. 44. P. 2569–2577. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.05.048.
3. Фридман Л.И. Углеволкнистые адсорбенты, теоретические основы получения. *Хим. волокна*. 2010. No. 5. С. 30–32.
Fridman L.I. Carbon fiber adsorbents, theoretical bases of reception. *Khimicheskie volokna*. 2010. No. 5. P. 30–32 (In Russ.).
4. Кузнецов Б.Х. Синтез и применение углеродных сорбентов. М.: Химия, 1999.
Kuznetsov B.H. Synthesis and use of carbon adsorbents. Moscow. Khimiya, 1999 (In Russ.).
5. Золкин П.И., Островский В.С. Углеродные материалы в медицине. М.: Металлургиздат, 2014.
Zolkin P.I., Ostrovskii V.S. Carbon materials in medicine. Moscow: Metallurgizdat, 2014 (In Russ.).
6. Афанасов И.М., Шорникова О.Н., Власов И.И., Коган Е.В. Пористые углеродные материалы на основе терморасширенного графита. *Вестн. ДВО РАН*. 2009. No. 2. С. 171–175.
Afanosov I.M., Shornikova O.N., Vlasov I.I., Kogan E.V. Porous carbon materials based on thermally expanded graphite. *Vestnik DVO RAN*. 2009. Vol. 2. P. 171–175 (In Russ.).
7. Мухин В.М., Уганов П.В. Получение активированного угля на основе антрацита. Исследование его пористости и адсорбционных свойств. *Успехи в химии и хим. технологии*. 2013. No. 5. С. 35–42.
Mukhin V.M., Uganov P.V. Getting activated carbon based on anthracite. Investigation of its porosity and adsorption properties. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2013. Vol. 5. P. 35–42 (In Russ.).
8. Чеснокова Н.В., Миковаб Н.М., Иванов И.П., Кузнецова Б.Н. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия*. 2014. No. 7. С. 42–53.
Chesnokova N.V., Mikovab N.M., Ivanov I.P., Kuznetsova B.N. Obtaining carbon sorbents by chemical modification of fossil coals and plant biomass. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Khimiya*. 2014. Vol. 7. P. 42–53 (In Russ.).
9. Олонцев В.Ф., Фарберова Е.А., Минькова А.Л., Генералова К.Н., Белоусов К.С. Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологии производства. *Вестн. ПНИПУ*. 2015. No. 4. С. 9–20.
Olontsev V.F., Farberova E.F., Min'kova A.L., Generalova K.N., Belousov R.S. Optimisation of porous structure of adsorbent carbon in the of technological production. *Vestnik PNIPU*. 2015. Vol. 4. P. 9–20 (In Russ.).

10. Горина В.А., Чеблакова Е.Г., Золкин П.И. Влияние режимов термической обработки на удельную поверхность и пористую структуру углеродных волокон на основе вискозы. *Порошковая металлургия*. 2012. No. 4. С. 62—65.
Gorina V.A., Cheblakova E.G., Zolkin P.I. Effect of heat treatment on the specific surface area and pore structure of the carbon fibers based on viscose. *Poroshkovaya metallurgiya*. 2012. No. 4. P. 62—65 (In Russ.).
11. Beck N.V., Meech S.E., Norman P.R., Pears L.A. Characterisation of surface oxides on carbon and their influence on dynamic adsorption. *Carbon*. 2002. Vol. 40. P. 531—540.
12. Celzard A., Mareche J.F., Furdin G. Modelling of exfoliated graphite. *Progr. Mater. Sci.* 2005. Vol. 50. No. 1. P. 93—179.
13. Barrett E.P., Joyner L.G., Halenda P.H. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *J. Amer. Chem. Soc.* 1951. Vol. 73. No. 1. P. 373—380.
14. Horvath G., Kawazoe K. Method for the calculation of effective pore size distribution in molecular sieve carbon. *J. Chem. Eng. Jpn.* 1983. No. 16. P. 470—475. <https://doi.org/10.1252/jcej.16.470>.
15. Грэг С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984.
Greg S., Sing K. Adsorption, surface area and porosity. Moscow: Mir, 1984 (In Russ.).
16. Thommes M., Kaneko K., Neimark A., Olivier J., Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2015. Vol. 87. P. 1051—1070.
17. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. В сб.: *Современные проблемы теории адсорбции*. М.: Наука, 1995. С. 34—42.
Dubin M.M. Adsorption and porosity. In: *Modern problems of the theory of adsorption*. Moscow: Nauka, 1995. P. 34—42 (In Russ.).
18. Everett D.H. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. Appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. Part 1. Colloid and surface chemistry. *Pure Appl. Chem.* 1972. Vol. 31. P. 577—638.
19. Cychosz K.A., Guillet-Nicolas R., Gracia-Martinez J., Thommes M. Recent advances in the textural characterization of hierarchically structured nanoporous materials. *Chem. Soc. Rev.* 2000. Vol. 46. P. 389—414.
20. Темирханов Б.А., Султыгова З.Х., Саламов А.Х., Нальгиева А.М. Новые углеродные материалы для ликвидации разливов нефти. *Фундам. исследования*. 2012. No. 6 (ч. 2). С. 471—475.
Temirkhanov B.A., Sultygova Z.Kh., Salamov A.Kh., Nalgieva A.M. New carbon materials for oil spill response. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012. No. 6 (part 2). P. 471—475 (In Russ.).
21. Phadungbut P., Herrera L.F., Do D.D., Tangsathitkulchai C., Nicholson D., Junpirom S. Computational methodology for determining textural properties of simulated porous carbons. *Colloid Interface Sci.* 2017. Vol. 503. P. 28—38.
22. Hakan Demiral, İlknur Demiral, Fatma Tümsük, Belgin Karabacakoglu. Pore structure of activated carbon prepared from hazelnut bagasse by chemical activation. 2008. 04 February. <https://doi.org/10.1002/sia.2631>. Cited by: 29 ePDFPDFTOOLS SHARE.
23. Ho C., Qian K.K., Bismarck H.A. Carbon fiber: Surface properties. In: *Wiley Encyclopedia of Composites*. 2011. P. 1—11.
24. Goodhew P.J., Clarke A.J., Bailey J.E. Review of fabrication and properties of carbon-fibers. *Mater. Sci. Eng.* 1975. Vol. 17. P. 3—30.
25. Martinez-Alonzo A. Microporous texture of activated carbon fibers prepared from aramid fiber pulp. *Microporous Mater.* 1997. No. 11. P. 303—311.
26. Uraki Y., Nakatani A., Kubo S., Sano Y. Preparation of activated carbon fibers with large specific surface area from softwood acetic acid lignin. *J. Wood. Sci.* 2001. Vol. 47. P. 465—469. DOI: 10.1007/BF00767899.
27. Shibagaki K., Motojima S., Umamoto Y., Nishitanib Y. Outermost surface microstructure of as-grown, heat-treated and partially oxidized carbon microcoils. *Carbon*. 2001. Vol. 39. P. 1337—1342.
28. Ханов А.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Каравая Д.М., Смирнов Д.В., Исаев О.Ю. Особенности строения терморасширенного графита. *Неорган. материалы*. 2014. Т. 50. No. 4. С. 372—376
Khanov A.M., Makarova L.E., Degtyarev A.I., Karavaev D.M., Smirnov D.V., Isaev O.Yu. Features of the structure of thermally expanded graphite. *Neorganicheskie materialy*. 2014. Vol. 50. No. 4. P. 372—376 (In Russ.).