



УДК 661.66

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-34-40>

Научная статья
Research article



Исследования свойств высокопрочных волокон методами физико-химического анализа

Е. Г. Чеблакова, Б. С. Клеусов[✉], В. И. Сапожников, В. А. Горина,
Ю. А. Малинина, А. Р. Гареев

Научно-исследовательский институт конструкционных материалов
на основе графита им. С.Е. Вяткина (АО «НИИГрафит»)
Россия, 111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1

✉ BSKleusov@rosatom.ru

Аннотация. Проведено исследование углеволокна (УВ) марки УМТ 49-12К-ЕР ООО «Алабуга-Волокно» (АО «Юматекс»). Изучены его физико-химические свойства. С помощью рентгеновской дифракции и атомно-эмиссионной спектроскопии определены межплоскостные размеры и химический состав УВ. Исследования поверхностных свойств углеволокна (удельной поверхности и распределения пор по размерам) проведены по адсорбции азота. Удельная поверхность рассчитана по методу БЭТ и составила 0,29 м²/г. Объем мезопор и их распределение по размерам рассчитывали по методу Баррета, Джойнера и Халенды. Методом обратного титрования проведен анализ содержания поверхностных функциональных групп. Наличие карбоксильных, фенольных и карбонильных групп не обнаружено. Обработку дифрактограмм осуществляли посредством двухкомпонентной модели описания профиля. По результатам атомно-эмиссионного спектрального анализа установлено, что в примесном химическом составе углеволокна преобладают соединения кремния. Подтверждено, что в инертной среде эпоксидный аппрет, которым пропитано данное УВ для улучшения эксплуатационных свойств, подвергается термической деструкции при температурах 300–400 °С, в то время как само углеволокно не теряет массу при нагревании до 950 °С. Установлено, что данное УВ сгорает на воздухе при температуре свыше 550 °С, что превышает температуру, указанную в литературе для углеродного волокна без специальных добавок. По результатам проведенных исследований предложены методики исследования углеволокна.

Ключевые слова: углеволокно, рентгенофазовый структурный анализ (РФСА), синхронный термический анализ (СТА), атомный эмиссионный спектральный анализ (АЭСА), удельная поверхность, метод БЭТ, функциональные группы

Для цитирования: Чеблакова Е.Г., Клеусов Б.С., Сапожников В.И., Горина В.А., Малинина Ю.А., Гареев А.Р. Исследования свойств высокопрочных волокон методами физико-химического анализа. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2023;17(4):34–40. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-34-40>

Investigation of the properties of high-strength fibers by methods of physico-chemical analysis

E. G. Cheblakova, B. S. Kleusov[✉], V. I. Sapozhnikov, V. A. Gorina,
Yu. A. Malinina, A. R. Gareev

Vyatkin R&D Institute of Graphite-Based Structural Materials (JSC “NIIGraphit”)
2 Bld. 1, Elektrodnaia Str., Moscow 111524, Russia

✉ BSKleusov@rosatom.ru

Abstract. The carbon fiber (CF) of UMT 49-12K-ER grade, manufactured by Alabuga-Volokno LLC (Umatex JSC), was the subject of an extensive study. This investigation encompassed an analysis of its physico-chemical properties. The interplanar dimensions and chemical composition of the CF were determined using X-ray diffraction and atomic emission spectroscopy. Surface properties of the CF, including specific surface area and pore size distribution, were investigated through nitrogen adsorption. The BET specific

surface area was measured at 0.29 m²/g. The volume of mesopores and their size distribution were calculated using the Barrett, Joyner, and Halenda method. Additionally, an analysis of surface functional groups was conducted through a back titration method. It was observed that there was no presence of carboxyl, phenolic, or carbonyl groups. The diffraction patterns were processed with a two-component profile description model. The results of atomic emission spectral analysis revealed that silicon compounds were the dominant impurities in the chemical composition of the CF. Further investigations determined that, in an inert environment, the epoxy coupling agent used to enhance the performance properties of this CF undergoes thermal decomposition at temperatures of 300–400 °C. The CF itself does not experience weight loss when heated up to 950 °C. It was also discovered that this CF ignites in the presence of oxygen at temperatures exceeding 550 °C, surpassing the thresholds noted in previous publications for carbon fibers without such specialized additives. The results of this research have suggested new methodologies for studying carbon fibers.

Keywords: carbon fiber, X-ray phase structural analysis (XPSA), synchronous thermal analysis (STA), atomic emission spectral analysis (AES), specific surface area, BET method, functional groups

For citation: Cheblakova E.G., Kleusov B.S., Sapozhnikov V.I., Gorina V.A., Malinina Yu.A., Gareev A.R. Investigation of the properties of high-strength fibers by methods of physico-chemical analysis. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(4): 34–40. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-34-40>

Введение

В настоящее время сфера применения высокопрочных углеродных волокон (УВ) весьма широка. Развитие техники, транспорта, строительства сегодня невозможно без использования волокнистых материалов. УВ являются одним из основных видов армирующих элементов, применяемых при создании композиционных материалов. Для их производства используются различные полимерные волокна, чаще всего полиакрилонитрильные (ПАН-волокна). Эти волокна обладают высокой прочностью, достаточно высоким модулем упругости, низким удельным весом, не теряют свою массу при высоких температурах, что позволяет использовать их во многих областях. В научно-технической литературе этому вопросу в последние десятилетия посвящено значительное количество работ [1–18]. В то же время влияние некоторых физико-химических параметров на конечные свойства УВ недостаточно полно изучено.

Целью данной работы являлось комплексное исследование углеволокна посредством рентгенофазового структурного анализа (РФСА), синхронного термического анализа (СТА), атомно-эмиссионного спектрального анализа (АЭСА), томографических исследований, изучения поверхностных свойств волокна. Проведено обобщение полученных результатов.

В качестве исходного материала для экспериментальных исследований было выбрано волокно марки UMT 49-12K-EP, представленное ООО «Алабуга-Волокно» (АО «Юматекс»).

Использование полученных результатов физико-химических аналитических исследований позволяет разработать и предложить методики дальнейшего изучения УВ.

Методики исследования

Изображение волокон было получено на микро-томографе высокого разрешения «SkyScan 1272»

(Bruker, Германия). Режим съемки: без использования фильтра, 50 кВ, 200 мА, шаг вращения – 0,1°, размер пикселя – 3,81 мкм. Реконструкция по сечениям выполнена в программах «NRecon» и «CTvox».

Рентгенофазовый структурный анализ проводили на дифрактометре «D8 Advance» (Bruker, Германия). В качестве источника рентгеновского излучения использовалась медная рентгеновская трубка с максимальной мощностью 2200 Вт, излучением CuK_α (длина волны $\lambda = 0,15418$ нм) в геометрии Брегга-Брентано (на отражение). Рентгеновскую съемку выполняли в диапазоне углов $2\theta = 10^\circ\div 90^\circ$. Экспозиция съемки составляла порядка 10 мин. Волокна помещались на кремниевую кювету с низким фоном при равномерном распределении их по ее площади. Перед каждым измерением проводилась инициализация трубки и детектора. Для расшифровки дифрактограмм применяли специализированную программу TOPAS. Абсолютная погрешность при измерении угловых положений дифракционных максимумов не превышала $\pm 0,026^\circ$.

Атомно-эмиссионный спектральный анализ УВ проводили на ДФС-8 (компания «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) в диапазоне длин волн 220–330 нм. Масса образца составляла 7 мг. В качестве нижнего электрода использовался электрод «с рюмкой» (тип IV), а в качестве верхнего – электрод, заточенный под конус (тип I). Волокна помещались в кратер нижнего электрода и присыпались графитом ОСЧ. Время экспозиции – 10 с. Применялась дуга постоянного тока 17 А. Спектры регистрировались посредством фотоэлектронной кассеты. Обсчет спектров выполнялся с помощью программы SM 2008 (ООО «МОПС», г. Троицк).

Образец УВ также был исследован методом синхронного термического анализа с помощью прибора «STA 449 F1 Jupiter» (Netzsch, Германия). Анализ углеволокна проводился в следующих условиях:

1) среда – аргон (40 мл/мин), масса образца – 5 мг, равномерный нагрев со скоростью 5 °C/мин в темпе-

ратурном интервале 25–955 °С с выдержкой 10 мин при максимальной температуре;

2) среда – воздух (40 мл/мин), масса образца – 5 мг, равномерный нагрев со скоростью 5 °С/мин в температурном интервале 25–950 °С.

Для обработки полученных результатов использовали программное обеспечение «Proteus Thermal Analysis v.5.1.0» (Netzsch, Германия).

Обработка экспериментальных данных заключалась в определении температур начала потери массы, остаточной массы образца при конечной температуре, температурных интервалов протекания процессов с тепловыми эффектами (экзо- или эндотермических процессов), температур пиковых значений тепловых эффектов и т.д.

Результаты и их обсуждение

Внешний вид исходного волокна представлен на рис. 1.

Обработку дифрактограмм осуществляли посредством двухкомпонентной модели описания профиля. На рис. 2 приведена дифрактограмма углеродного волокна UMT 49-12K-EP. Видно, что оно представляет собой аморфный материал. Углеродные волокна относятся к неграфитирующимся материалам, т.е. стопки из кристаллитов расположены хаотически и имеют малый размер по сравнению с графитирующимися материалами. При этом присутствует асимметрия в сторону малых углов, что традиционно объясняется наличием нескольких структурных компонентов (СК). В данной работе выбрана двухкомпонентная модель описания профиля (рис. 3). Компонент с большим межплоскостным расстоянием принято считать ядром, а с меньшим – оболочкой. Примерное содержание компонентов, оцененное по площади пиков, составляет: для СК 1 – 57 мас. %, а для СК 2 – 47 мас. %.



Рис. 1. Фрагмент волокна UMT 49-12K-EP (3D-реконструкция)

Fig. 1. UMT 49-12K-EP fiber fragment (3D reconstruction)

Из таблицы видно, что УВ обладает большим межплоскостным расстоянием и малыми размерами кристаллитов – говорит о том, что данное волокно

Данные рентгенофазового анализа углеродного волокна UMT 49-12K-EP

Data from X-ray phase analysis of UMT 49-12K-EP carbon fiber

Структурный компонент	d_{002} , нм	L_c , нм
СК 1	0,3523	2,2
СК 2	0,3894	1,4
Примечание. d_{002} – межплоскостное расстояние; L_c – размер кристаллитов (перпендикулярно слою).		
Погрешность измерений для d_{002} составляла 0,05 %, для L_c – 4,1%.		

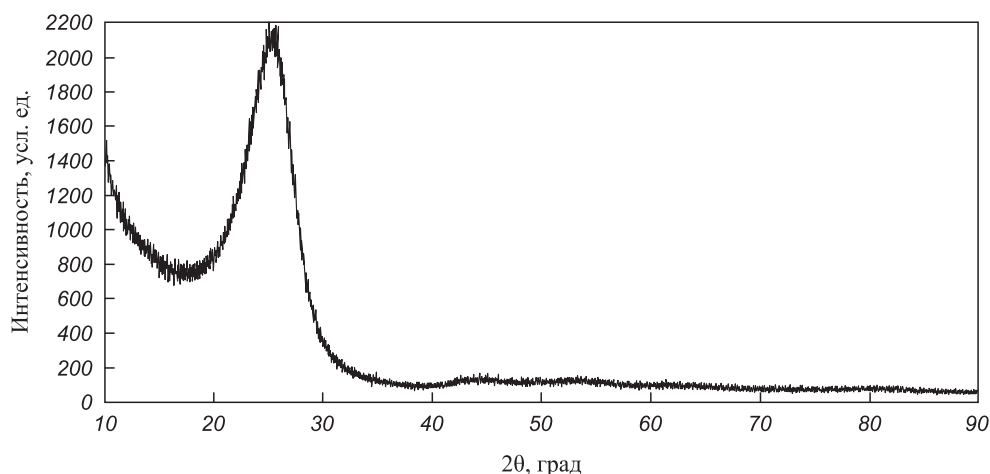


Рис. 2. Дифрактограмма углеродного волокна

Fig. 2. Carbon fiber diffraction pattern

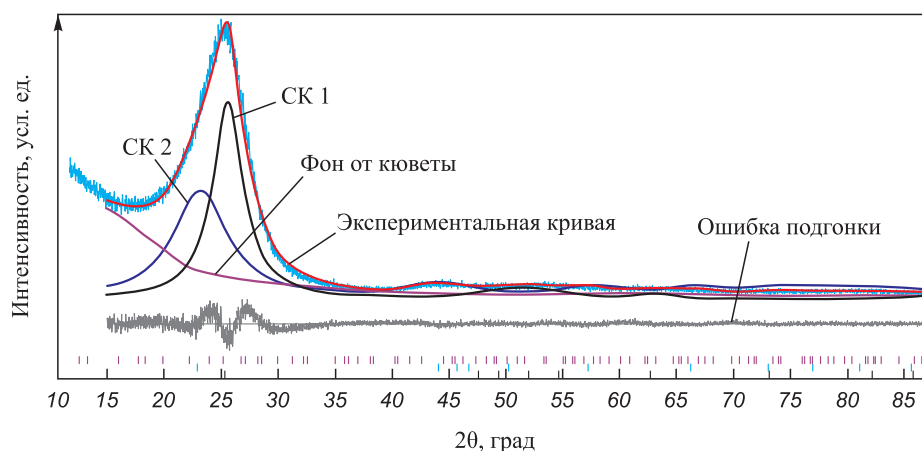


Рис. 3. Пример расчета по двухкомпонентной модели

Fig. 3. Example of calculation using a two-component model

относится больше к аморфным неграфитирующимся материалам.

Содержание примесей в углеволокне определяли по МИИ0200851-323-2009 (методика АО «НИИГрафит»). Абсолютная погрешность АЭСА составляла 70–0,5 ppm.

Результаты атомно-эмиссионного спектрального анализа образца UMT 49-12K-EP представлены ниже, ppm:

Al ... 41	Mg ... 30	Mo ... 17	Cd ... 3
B ... 5	Ca ... 230	Ti ... 26	Ni ... 7
Fe ... 73	Co ... 40	Mn ... <0,1	Pb ... 4
Si ... 420	Cr ... 3	Cu ... 6	V ... 4
$\Sigma_{\text{примесей}} - 909$			

Видно, что наибольший вклад в общую сумму примесей вносит кремний, за присутствие которого отвечает добавка элементоорганического соединения, содержащего кремний, на стадии получения прекурсора для последующей каталитической графитации УВ.

Причина наличия Si в высокопрочных УВ подробно описана в работе [19].

Результаты термического анализа УВ представлены в виде графиков зависимостей сигналов ТГ и ДСК от температуры (рис. 4).

Видно, что в инертной среде (рис. 4, а) при повышении температуры от <100 °С образец УВ начинает терять массу. По достижении 300 °С наблюдается ее потеря в 0,3 % за счет постепенного удаления незначительного количества остаточной влаги и некоторой части летучих веществ. При дальнейшем росте температуры скорость потери массы значительно увеличивается в результате протекания термической деструкции эпоксидного аппрета, наносимого на углеволокно для улучшения смачиваемости и адгезии полимерных связующих к поверхности УВ при создании композиционных материалов. Уменьшение массы на 1,5 % в интервале $t = 300 \div 400$ °С соотносится с содержанием аппрета в УВ, заявленным производителем (1,2–1,7 мас. %). При последующем нагревании в аргоне потеря массы практически прекращается (<0,1 мас. %

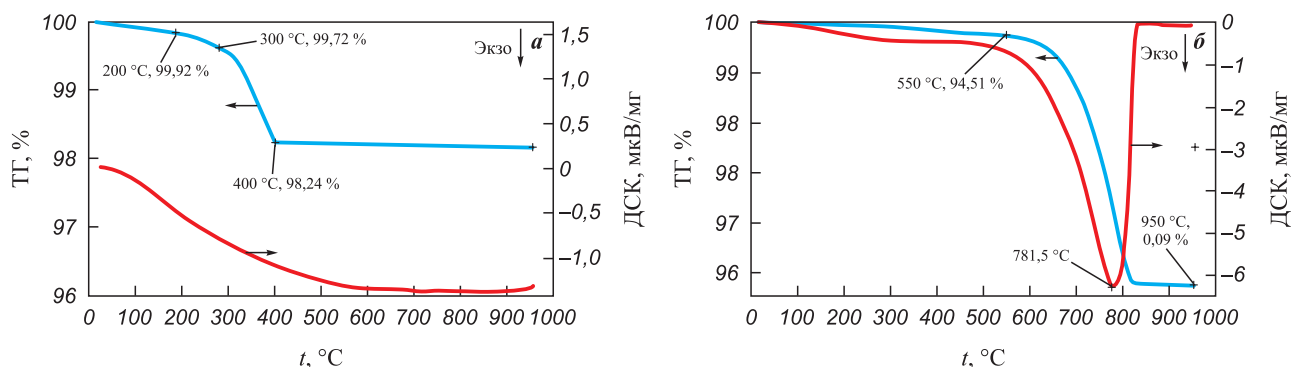


Рис. 4. Результаты синхронного термического анализа углеволокна UMT 49-12K-EP в инертной среде (аргон) (а) и на воздухе (б)

Fig. 4. Results of simultaneous thermal analysis of UMT 49-12K-EP carbon fiber in an inert environment (argon) (a) and in air (b)

при $t = 400 \div 955$ °С). Остаточная масса УВ при конечной температуре составляет 98,15 мас. %, что соответствует литературным данным, согласно которым в инертной среде углеродное волокно способно выдержать нагревание свыше 1000 °С без изменения механических показателей [3]. Высокая термическая стойкость достигается благодаря этапу высокотемпературной термической обработки при производстве углеродного волокна.

В присутствии кислорода воздуха при достижении $t = 550$ °С образец УВ теряет более 5 % своей массы. При дальнейшем увеличении температуры происходит активное окисление (сгорание) образца, сопровождающееся значительным экзотермическим эффектом (пик на кривой ДСК при $t = 781,5$ °С). В работах [1; 3] указано, что в воздушной среде предельная температура эксплуатации углеволокна без добавок, после которой начинается термоокисление, составляет 300–370 °С. Учитывая, что остаточная масса при $t = 950$ °С примерно равна 0,09 мас. % (900 ppm) от исходной и соотносится с вышеприведенными результатами АЭСА ($\Sigma_{\text{примесей}} = 909$ ppm), можно сделать вывод, что несгоревший остаток составляют примеси соединений кремния, кальция и других элементов, содержащихся в незначительном количестве в составе углеволокна. Эти соединения, по всей видимости, способствуют росту термоокислительной стабильности УВ на воздухе.

Исследования поверхностных свойств волокна UMT 49-12K-EP проведены по адсорбции азота на приборе ASAP 2020 (Micromeritics, США). Удельную поверхность рассчитывали по методу БЭТ, объем мезопор (диаметром < 900 Å) и их распределение по размерам – по методу Баррета, Джойнера и Халенды (BJH) в интервале давлений 0,35–0,95 p/p_s .

Результаты измерения поверхностных свойств УВ:

$$\begin{aligned} S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г} & \dots\dots\dots 0,29 \\ V_{\text{п}}, \text{ см}^3/\text{г} & \dots\dots\dots 0,0002 \\ D_{\text{п}}, \text{ Å} & \dots\dots\dots 255 \end{aligned}$$

Здесь $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность, $V_{\text{п}}$ – относительный объем мезопор, $D_{\text{п}}$ – их средний диаметр.

На рис. 5 показано распределение мезопор по размерам. Кривая зависимости относительного объема пор от их диаметра имеет выраженные пики, соответствующие присутствию групп пор одинакового размера.

На рис. 6 представлена изотерма исследованного образца УВ. Она относится к 4-му типу изотерм по международной классификации БДТ и характерна для непористых материалов, в частности ПАН волокна. На адсорбционной ветви с увеличением относительного показателя p/p_s наблюдаются равномерный рост значений удельной сорбции ($V_{\text{адс}}$) и их

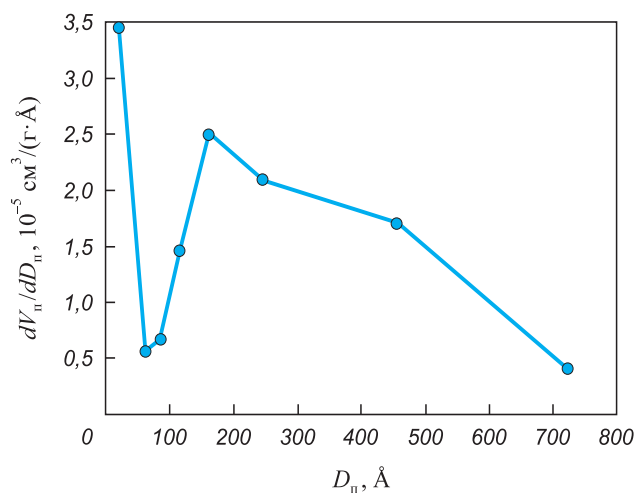


Рис. 5. Интегральная зависимость относительного объема мезопор от их диаметра

Fig. 5. Relative volume of mesopores as an integral function of their diameter

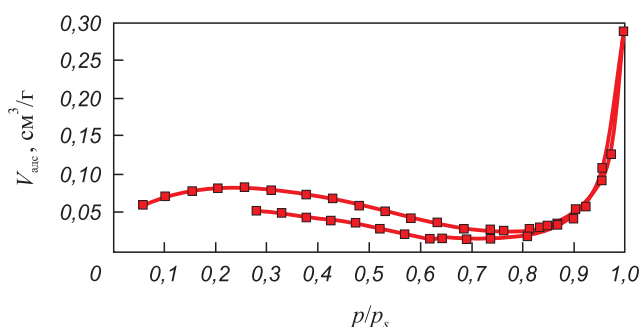


Рис. 6. Изотерма адсорбции-десорбции азота

Fig. 6. Nitrogen adsorption-desorption isotherm

резкий подъем около $p/p_s = 1$. Изотерма имеет протяженный необратимый гистерезис.

Определение содержания поверхностных функциональных групп в углеволокне выполнено согласно методике МИ-00200851-331-2010 (АО «НИИГрафит»). В результате анализа наличие карбоксильных, фенольных и карбонильных групп не обнаружено.

Из полученных данных можно сделать вывод, что поверхность волокна не активирована и не имеет кислотно-основных центров. В целом, по своим поверхностным свойствам, волокно соответствует классу углеродных волокон на основе ПАН-прекурсора [20–22] и является адсорбционно и химически неактивным, что может в дальнейшем определять области его применения.

Выводы

1. Определены и оценены структурные характеристики углеволокна, показан его химический состав. Установлено, что углеволокно имеет нераз-

витуую поверхность и не содержит поверхностных карбоксильных, фенольных и карбонильных групп.

2. Выявлено, что в примесном химическом составе углеволокна преобладают соединения кремния.

3. Определены температуры протекания термической деструкции аппарата углеродного волокна в инертной среде (300–400 °C). Показано, что само углеродное волокно выдерживает нагрев до 950 °C без потери массы.

4. Установлено, что наличие элементоорганических соединений в составе УВ способствует росту термоокислительной стабильности: окисление (сгорание) начинается при температурах свыше 550 °C вместо 350 °C для УВ без добавок.

5. Предложены физико-химические методики исследования углеволокна.

Список литературы / References

1. Фиалков А.С. Углеграфитовые материалы. М.: Энергия, 1979. 320 с.
2. Айзенштейн Э.М., Клепиков Д.Н. Полиэфирные волокна: сегодня и завтра. *Вестник химической промышленности*. 2016;91(4):6–10
Aizenshtein E.M., Klepikov D.N. Polyester fibers: today and tomorrow. *Vestnik Khimicheskoi Promyshlennosti*. 2016;91(4):6–10. (In Russ.).
3. Симамура С. (ред.). Углеродные волокна. М.: Мир, 1987. 304 с.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*. 2015;34(1):3–33.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of RF on realization of “Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*. 2015;34(1):3–33. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
5. Мелешко А.И., Семенов В.И., Шайдуров В.С. Производство углеродных волокон и пластиков на их основе. Под ред. С.П. Половникова. ГОНТИ-25. 1992;VIII(60):49.
6. Тюменцев В.А., Фазлитдинова А.Г. Исследование волокнистых углеродных материалов методом рентгеновской дифрактометрии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019;85(11):31–36.
Tyumentsev V.A., Fazlitdinova A.G. Study of fibrous carbon materials using X-ray diffractometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019;85(11):31–36. (In Russ.).
7. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: Сайнс-Пресс, 2007. 192 с.
8. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра. *Металлы Евразии*. 2015;1:36–39.
Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*. 2015;1:36–39. (In Russ.).
9. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Рынок углеродных волокон и композитов на их основе. *Химические волокна*. 2016;4:48–53.
Sidorina A.I., Gunyaeva A.G. Market of carbon products and composites based on them. *Khimicheskie Volokna*. 2016;4:48–53. (In Russ.).
10. Bennett S.C., Johnson D.J., Johnson W.J. Strength-structure relationships in PAN-based carbon fibres. *Journal of Materials Science*. 1983;18:3337–3347.
11. Huang X. Fabrication and properties of carbon fibers. *Materials*. 2009;2:2369–2403.
12. Hu X., Wang L., Xu F., Xiao T., Zhang Z. *In situ* observations of fractures in short carbon fiber/epoxy composites. *Carbon*. 2014;67:368–376.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.10.007>
13. Goodhew P.J., Clarke A.J., Bailey J.E. Review of fabrication and properties of carbon-fibers. *Materials Science and Engineering*. 1975;17(1):3–30.
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(75\)90026-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(75)90026-9)
14. Панин М.И., Капустин В.М., Цимбалюк А.Е. Об использовании комплексных нитей для армирования волокнистых композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021;(6):103–106.
Panin M.I., Kapustin V.M., Tsybalyuk A.E. The use of complex filaments for reinforcement of fibrous composite materials used in the oil and gas industry. *Izvestiya Vuzov. Tekhnologiya Tekstilnoi Promyshlennosti*. 2021;(6):103–106. (In Russ.).
15. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax. *Авиационные материалы и технологии*. 2018;3(52):18–26.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26>
Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*. 2018;3(52):18–26. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26>
16. Morgan P. Carbon fibers and their composites. London: Taylor and Francis. 2005. 1200 p.
17. Park S.-J. Carbon fibers. 2nd ed. Springer, 2018. 366 p. (Springer Series in Materials Science, Vol. 210).
18. Frank E., Steudle L.M., Ingildeev D., Spörl J.M., Buchmeiser M.R. Carbon fibers: Precursor systems, processing, structure, and properties. *Angewandte Chemie International Edition in English*. 2014;53(21):5262–5298.
<https://doi.org/10.1002/anie.201306129>
19. Вербец Д.Б., Самойлов В.М., Бубненко И.А., Бучнев Л.М., Находнова А.В., Степарева Н.Н. Изменение

структуры и свойств углеродных волокон при графитации с использованием вытяжки или галогенсодержащей среды. В сб.: *Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита – 60 лет*. М.: Научные технологии, 2020. С. 86–102.

20. 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;40:531–540. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00144-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00144-0)

21. Ho K., Qian H., Bismarck A. Carbon fiber: Surface properties. In: *Wiley Encyclopedia of Composites*. John Wiley & Sons, Inc., 2011. P. 1–11. <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc024>

22. Martínez-Alonso A., Jamond M., Montes-Morán M.A., Tascón J.M.D. Microporous texture of activated carbon fibers prepared from aramid fiber pulp. *Microporous and Mesoporous Materials*. 1997;11:303–311. [https://doi.org/10.1016/S0927-6513\(97\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0927-6513(97)00050-3)

Сведения об авторах



Information about the Authors

Елена Геннадьевна Чеблакова – к.т.н., ст. науч. сотрудник, начальник Испытательного центра углеродных материалов АО «НИИГрафит»

 **ORCID:** 0000-0003-4921-095X


 **E-mail:** EGCheblakova@rosatom.ru


Борис Сергеевич Клеусов – науч. сотрудник Испытательного центра углеродных материалов АО «НИИГрафит»

 **ORCID:** 0000-0003-3924-2616

 **E-mail:** BSKleusov@rosatom.ru

Вадим Игоревич Сапожников – науч. сотрудник Испытательного центра углеродных материалов АО «НИИГрафит»

 **ORCID:** 0000-0003-3433-3631


 **E-mail:** ValSapozhnikov@rosatom.ru

Валентина Анатольевна Горина – науч. сотрудник Испытательного центра углеродных материалов АО «НИИГрафит»

 **ORCID:** 0000-0002-7470-5578

 **E-mail:** VAGorina@rosatom.ru

Юлия Алексеевна Малинина – науч. сотрудник Испытательного центра углеродных материалов АО «НИИГрафит»

 **ORCID:** 0000-0002-7677-2803

 **E-mail:** YAMalinina@rosatom.ru

Артур Радикович Гареев – к.т.н., заместитель директора по науке и инновациям АО «НИИГрафит»

 **ORCID:** 0000-0001-5934-8456

 **E-mail:** ARGareev@rosatom.ru

Elena G. Cheblakova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Testing Center of Carbon Materials of NIIGraphite JSC

 **ORCID:** 0000-0003-4921-095X

 **E-mail:** EGCheblakova@rosatom.ru


Boris S. Kleusov – Researcher of Testing Center of Carbon Materials of NIIGraphite JSC

 **ORCID:** 0000-0003-3924-2616

 **E-mail:** BSKleusov@rosatom.ru

Vadim I. Sapozhnikov – Researcher of Testing Center of Carbon Materials of NIIGraphite JSC

 **ORCID:** 0000-0003-3433-3631


 **E-mail:** ValSapozhnikov@rosatom.ru

Valentina A. Gorina – Researcher of Testing Center of Carbon Materials of NIIGraphite JSC

 **ORCID:** 0000-0002-7470-5578

 **E-mail:** VAGorina@rosatom.ru

Yuliya A. Malinina – Researcher of Testing Center of Carbon Materials of NIIGraphite JSC

 **ORCID:** 0000-0002-7677-2803

 **E-mail:** YAMalinina@rosatom.ru

Artur R. Gareev – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Science and Innovation of NIIGraphite JSC

 **ORCID:** 0000-0001-5934-8456

 **E-mail:** ARGareev@rosatom.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

Е. Г. Чеблакова – определение цели работы, первоначальная редакция, написание статьи.

Б. С. Клеусов – проведение рентгенофазового анализа и атомно-эмиссионного спектрального анализа, участие в обсуждении результатов.

В. И. Сапожников – проведение синхронного термического анализа, участие в обсуждении результатов.

В. А. Горина – проведение компьютерной томографии и определение поверхностных свойств, участие в обсуждении результатов.

Ю. А. Малинина – определение функциональных групп, участие в обсуждении результатов.

А. Р. Гареев – постановка задачи исследования, общая редакция статьи, участие в обсуждении результатов.

E. G. Cheblakova – formulated the research objectives, carried out the initial draft of the article, and authored the manuscript.

B. S. Kleusov – conducted X-ray phase analysis and atomic emission spectral analysis, contributed to result discussions.

V. I. Sapozhnikov – performed synchronous thermal analysis, participated in result discussions.

V. A. Gorina – carried out computer tomography and assessed surface properties, contributed to result discussions.

Yu. A. Malinina – identified functional groups, participated in result discussions.

A. R. Gareev – framed the research objectives, oversaw general article editing, and participated in result discussions.

Статья поступила 27.09.2022 г.

Доработана 01.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Received 27.09.2022

Revised 01.12.2022

Accepted 09.12.2022