

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ УГЛЕРОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНА УКН/5000

Е.В. Сидорова, Н.С. Стариченко, А.П. Карпов,
А.Г. Федюшкина, Ю.В. Бехелева, В.А. Ельчанинова

Екатерина Владимировна Сидорова (ORCID 0009-0005-2926-109X)*, Наталия Сергеевна Стариченко (ORCID 0009-0006-4415-7175), Анна Генриховна Федюшкина (ORCID 0009-0009-8987-9851), Юлия Владимировна Бехелева (ORCID 0009-0002-4719-8491)

Отдел конструкционных графитов, Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», ул. Электродная, 2, Москва, Российская Федерация, 111524

E-mail: evlsidorova@rosatom.ru*, nsstarichenko@rosatom.ru, agfedyushkina@rosatom.ru, yvbekheleva@rosatom.ru

Виктория Андреевна Ельчанинова (ORCID 0009-0006-3167-8924)

Технологический отдел, Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», ул. Электродная, 2, Москва, Российская Федерация, 111524

E-mail: viaelchaninova@rosatom.ru

Андрей Павлович Карпов (ORCID 0009-0001-8340-1728)

Управление углерод углеродных композиционных материалов, Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», ул. Электродная, 2, Москва, Российская Федерация, 111524

E-mail: anpkarpov@rosatom.ru

В результате исследования установлено, что важнейшим фактором, определяющим эксплуатационные свойства изделий из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), является адгезионное взаимодействие на границе наполнитель-связующее, зависящее от адсорбционной способности углеродных волокон (УВ) и смачивающей способности прекурсора матрицы (каменноугольного пека). Свойства УВ закладываются полиакрилонитрильным (ПАН) сырьем и технологией изготовления. В ходе исследования изучены свойства углеродных волокон, полученных на основе различного ПАН-сырья, и установлено значительное отличие в структурных характеристиках (d_{002} , ID/IG), а также энергии активации и удельной поверхности, обуславливающих различие в дефектности поверхности УВ. Изготовлены и исследованы углеродные стержни на основе данных волокон с дополнительной пропиткой аппретирующим составом на основе поливинилового спирта (ПВС). Разработана методика исследования смачиваемости углеродных стержней непосредственно каменноугольным пеком. Получена зависимость смачиваемости образцов углеродных стержней каменноугольным пеком в диапазоне температур от 60 до 150 °С. Зафиксировано формоизменение пека при нагревании и снижении вязкости, характеризующее последовательное изменение физического состояния от упруговязкого до вязкотекучего. Определены температуры начала смачивания, минимальные краевые углы смачивания образцов углеродных стержней на основе углеродных волокон разного производства. Выполнены расчеты эффективной энергии активации для различных стадий смачивания и пропитки и выдвинуты предположения о кинетике протекания процессов в различных температурных интервалах. Установлено, что аппретирующий состав при изготовлении углеродных стержней оказывает доминирующее влияние на функциональность поверхности и соответственно смачиваемость прекурсором матрицы и адгезионное взаимодействие между компонентами композита.

Ключевые слова: смачиваемость, углеродные волокна, пропитка, углерод-углеродные композиционные материалы

STUDY OF WETTABILITY OF CARBON RODS BASED ON UKN/5000 FIBRE

E.V. Sidorova, N.S. Starichenko, A.P. Karpov, A.G. Fedushkina, Yu.V. Bekheleva, V.A. Yelchaninova

Ekaterina V. Sidorova (ORCID 0009-0005-2926-109X)*, Natalia S. Starichenko (ORCID 0009-0006-4415-7175), Anna G. Fedushkina (ORCID 0009-0009-8987-9851), Yulia V. Bekheleva (ORCID 0009-0002-4719-8491)

Department of Structural Graphites, Research Institute of Graphite-Based Structural Materials «NIIgraphite», Elektrodная st., 2, Moscow, 111524, Russia

E-mail: evlsidorova@rosatom.ru*, nsstarichenko@rosatom.ru, agfedushkina@rosatom.ru, yvbekheleva@rosatom.ru

Victoria A. Yelchaninova (ORCID 0009-0006-3167-8924)

Technology department, Research Institute of Graphite-Based Structural Materials «NIIgraphite», Elektrodная st., 2, Moscow, 111524, Russia

E-mail: viaelchaninova@rosatom.ru

Andrey P. Karpov (ORCID 0009-0001-8340-1728)

Department of Carbon Carbon Composite Materials, Research Institute of Graphite-Based Structural Materials «NIIgraphite», Elektrodная st., 2, Moscow, 111524, Russia

E-mail: anpkarpov@rosatom.ru

As a result of the study, it was established that the most important factor determining the operational properties of products made of carbon-carbon composite materials (CCCM) is the adhesive interaction at the filler-binder interface, which depends on the adsorption capacity of carbon fibers (CF) and the wetting capacity of the matrix precursor (coal tar pitch). The properties of CF are determined by polyacrylonitrile (PAN) raw materials and manufacturing technology. The study examined the properties of carbon fibers obtained from various PAN raw materials and established a significant difference in structural characteristics (d002, ID/IG), as well as activation energy and specific surface area, which determine the difference in the defectiveness of the CF surface. Carbon rods based on these fibers with additional impregnation with a finishing composition based on polyvinyl alcohol (PVA) were manufactured and studied. A method for studying the wettability of carbon rods directly with coal tar pitch was developed. The dependence of the wettability of carbon rod samples with coal tar pitch in the temperature range from 60 to 150 °C was obtained. The change in pitch shape upon heating and viscosity reduction was recorded, characterizing the successive change in the physical state from elastic-viscous to viscous-flowing. The temperatures of the onset of wetting, the minimum contact angles of wetting of carbon rod samples based on carbon fibers of different manufacture were determined. The effective activation energy was calculated for different stages of wetting and impregnation, and assumptions were made about the kinetics of the processes in different temperature ranges. It was established that the finishing composition in the manufacture of carbon rods has a dominant effect on the functionality of the surface and, accordingly, the wettability of the matrix by the precursor and the adhesive interaction between the components of the composite.

Keywords: wettability, carbon fibres, impregnation, carbon-carbon composites

Для цитирования:

Сидорова Е.В., Стариченко Н.С., Карпов А.П., Федюшкина А.Г., Бехелева Ю.В., Ельчанинова В.А. Исследование смачиваемости углеродных стержней на основе волокна УКН/5000. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 20–27. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.8y.

For citation:

Sidorova E.V., Starichenko N.S., Karpov A.P., Fedushkina A.G., Bekheleva Yu.V., Yelchaninova V.A. Study of wettability of carbon rods based on UKN/5000 fibre. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 20–27. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.8y.

ВВЕДЕНИЕ

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) находят широкое применение в химической промышленности, авиационной и ракетно-космической технике за счет высоких теплофизических и физико-механических свойств. Технология изготовления композита заключается в формировании армирующего каркаса из наполнителя и заполнении его углеродной матрицей, образующейся из связующего в процессе термообработки. В роли связующего могут применяться органические смолы, нефтяные и каменноугольные пеки с различной температурой размягчения. В качестве наполнителя используют высокопрочные и высокомодульные углеродные волокна (УВ), основным сырьем для производства которых является ПАН-волокно, полученное путем пиролиза полимерных полиакрилонитриловых волокон и их последующей высокотемпературной обработки. Углеродные волокна имеют диаметр филамента от 6 до 10 мкм и представляют собой химически чистое вещество (99,9% углерода).

Для максимального наполнения матрицы композита наполнителем из исходного волокна формируют армирующие стержни методом пул-трузии – как наиболее эффективным методом получения высокопрочных длинномерных композиционных изделий постоянного сечения. Метод заключается в том, что предварительно пропитанные полимерной композицией углеродные волокна проходят через нагретую фильеру, где происходит формование будущего изделия и его отверждение, после чего на выходе из фильеры получают цилиндрические стержни заданного диаметра. При изготовлении стержней учитывают ряд параметров, таких как: показатель эллипсности (овальность) – это отношение разности наибольшего и наименьшего диаметров к номинальному диаметру стержня; показатель устойчивости – отражает способность стержня выдерживать осевую нагрузку; содержание аппрета в стержне – содержание исходного связующего в стержне и величина его коксового остатка оказывают влияние на пропитываемость и пористость при проведении последующих процессов пропитки каменноугольным пеком матрицы композита. Из армирующих стержней изготавливают каркас различной пространственной структуры, который подвергают последовательным процессам пропитки пеком и высокотемпературной обработки до достижения требуемых эксплуатационных свойств [1-3]. Прочностные характеристики УУКМ определяются как свойствами сырьевых

материалов, так и эффективностью взаимодействия компонентов [4-5].

На этапе пропитки каркаса из углеродных стержней важными характеристиками являются вязкость пека, его смачивающая способность, а также свойства поверхности УВ, что определяет интенсивность адгезионного взаимодействия связующего и поверхности наполнителя [6-8]. Смачивающая способность пека зависит от температуры и его компонентного состава [9-13], смачиваемость волокна обусловлена пористостью, наличием дефектов и функциональных групп на поверхности, что определяется свойствами сырья, а также технологией изготовления [7-8, 14-17]. С целью повышения адгезионного взаимодействия матрицы и наполнителя применяют различные физические и химические методы модификации углеродных волокон, такие как электрохимическая обработка, нанесение покрытий, формирование стержней из отдельных филаментов [18-21]. При изготовлении стержней из УВ в качестве аппрета применяют олигомеры, водорастворимые полимеры, эпоксидные смолы, вносящие значительный вклад в смачиваемость наполнителя и его совместимость с матрицей. При выборе аппрета необходимо учитывать наличие в нем реакционноспособных функциональных групп (аминных, эпоксидных и т.п.), а также избирательность адсорбции УВ [2, 14-15, 22-24].

Исследование смачиваемости твердой поверхности жидкостью возможно разными способами: по подъему жидкости в трубке с измельченным материалом [11], тензометрическим методом [25], методом лежащей капли на оптических установках [8, 12, 26] или с помощью сканирующей электронной микроскопии [27].

Большая часть работ по смачиваемости углеродных волокон описывает взаимодействие волокон с простыми органическими жидкостями, выступающими в роли аппретирующих составов или полимерного связующего. В то же время каменноугольный пек представляет собой сложную коллоидную систему, дисперсионная среда которой является смесью из различных низкомолекулярных химических веществ, а дисперсная фаза представлена тяжелыми высокомолекулярными соединениями. Ввиду сложности объекта исследования в литературных источниках содержится мало информации о смачиваемости непосредственно пеком углеродных волокон и стержней как иностранного, так и отечественного производства. Причем в большинстве работ исследования представлены на упрощенном уровне моделирования, что не позволяет отразить все явления на границе пек-волокно

и выявить факторы влияния на коллоидно-химические свойства системы. Таким образом, актуальным является исследование смачиваемости пеком углеродных волокон с целью усовершенствования технологий производства УУКМ.

Цель данной работы – исследование зависимости смачиваемости УВ пеком от технологии производства и предварительной обработки аппретом.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования были изготовлены два образца углеродных стержней диаметром 1,7-1,9 мм на основе углеродного волокна УКН/5000 по ГОСТ

28008 (образец 1) и УКН/5000 на основе нового ПАН-прекурсора производства ООО «Алабуга-волокно» (образец 2). На исходных углеродных волокнах снимались прочностные, рентгеноструктурные характеристики, удельная поверхность, спектр комбинационного рассеивания, а также рассчитывалась энергия активации при окислении кислородом воздуха в проточных условиях. В качестве аппретирующего состава при изготовлении стержней применяли раствор поливинилового спирта (ПВС) в дистиллированной воде.

В табл. 1 представлены сравнительные свойства образцов углеродных волокон.

Таблица 1

Характеристики исходных углеродных волокон

Table 1. Characteristics of raw carbon fibres

Показатели	УКН/5000 («Алабуга-волокно»)	УКН/5000 (ГОСТ 28008-88)
Фактическая линейная плотность, текс	420	409
Модуль упругости, ГПа	222,3	222,6
Плотность нити, г/см ³	1,776	1,728
Разрушающее напряжение элементарной нити при растяжении, ГПа	4,3	4,0
Массовая доля аппрета, %	3,6	3,5
Разрывная нагрузка нити при разрыве петель	16,5	15,3
d ₀₀₂ , нм	0,3617	0,3566
g, %	–	–
L _c , нм	1,2	1,4
Удельная поверхность, м ² /г	0,26	0,35
I _D /I _G , отн. ед.	3,079	2,051
T _{эфф.} , °C	1250	1520
Энергия активации, Ккал/моль	7,86	12,37

Измерение краевого угла смачивания (θ) углеродных стержней проводили по методу лежащей капли на установке определения смачиваемости ОСА 20 при нагревании в диапазоне температур от 60 до 150 °C. Скорость подъема температуры устанавливали 1,5 °C/мин. Нагрев проводили с помощью автоматического блока нагрева ТЕС 400 в среде аргона для предотвращения окисления пека. Для контроля температуры подложки использовали ртутный термометр с погрешностью определения температуры 0,5 °C. Фиксирование краевого угла смачивания производилось каждые 0,5 °C. Углеродный стержень закреплялся на графитовой подложке при помощи углеродного скотча (рис. 1) и помещался на нагревательную плиту рабочей камеры установки. Затем устанавливался ртутный термометр, непосредственно соприкасающийся с подложкой.



Рис. 1. Сборка из углеродных стержней на графитовой подложке

Fig. 1. Assembly from carbon rods on graphite substrate

В качестве жидкой фазы использовался среднетемпературный каменноугольный пек марки А по ГОСТ 10200 с температурой размягчения 71 °C. Так как при комнатной температуре пек представляет собой аморфное вещество с высокой вязкостью, то для исследования из куска пека подготов-

ливалась приближенная к сфере частица диаметром менее 1,5 мм. В ходе испытаний фиксировали изменение формы частицы пека, определяли температуру начала смачивания ($T_{нс}$), при которой краевой угол смачивания равен 90 град. и минимальный краевой угол смачивания при температуре 150 °С, что соответствует минимальной вязкости пека.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По конструкционным и прочностным характеристикам оба образца волокон показывают близкие значения, однако сравнительные исследования структуры выявили ряд существенных отличий углеродных волокон на основе различных ПАН-прекурсоров. Для образца производства ООО «Алабуга-волокно» показатель эффективной температуры обработки имеет значение на 270 °С ниже по сравнению с углеродными волокнами УКН/5000 по ГОСТ 28008-88. Кроме того, выявлено увеличение расстояния между графитовыми плоскостями d002 и отношения интенсивностей ID/IG, уменьшение размера кристаллитов по сравнению с образцом УКН/5000 на старом прекурсор, что свидетельствует о большей дефектности структуры волокна на новом ПАН-прекурсор.

Также для образца производства ООО «Алабуга-волокно» наблюдается снижение удельной поверхности на 30 %, а энергии активации в 1,5 раза относительно волокна по ГОСТ 28008-88.

Углеродные стержни, изготовленные из филаментов волокон из разного сырья, сопоставимы по показателю устойчивости и диаметру стержней.

Результаты исследования смачиваемости пеком углеродных стержней представлены на рис. 2-4 и в табл. 2.

При нагревании наблюдается значительное формоизменение частицы пека из неправильной формы в сферическую, что соответствует минимальной свободной поверхностной энергии, и полусферическую при смачивании поверхности стержней (рис. 2).

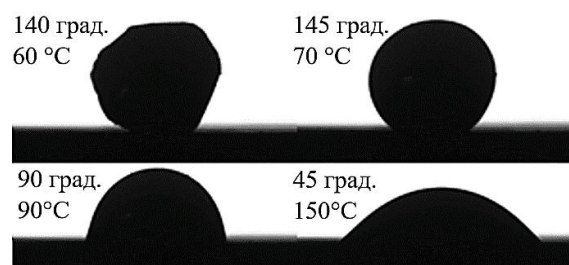


Рис. 2. Формоизменение капли при нагревании
Fig. 2. Change in the shape of a droplet upon heating

Таблица 2

Характеристики смачивания углеродных стержней

Table 2. Wetting characteristics of carbon rods

Образец	Температура начала смачивания, °С	Минимальный краевой угол смачивания, град.	Эффективная энергия активации, кДж/(моль*К) (начало смачивания)	Эффективная энергия активации, кДж/(моль*К) (минимальная вязкость пека)
1	90,6	40,31	34,3	10,4
2	90,4	41,84	36,0	7,4

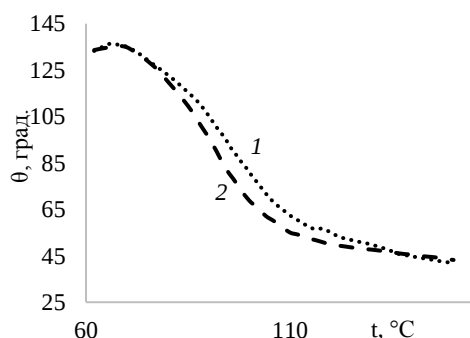


Рис. 3. Зависимость краевого угла смачивания от температуры

Fig. 3. Temperature dependence of the wetting edge angle

Характер политермы смачиваемости (рис. 3) связан с последовательным изменением твердого, пластического, вязко-текучего и жидкоподвижного состояния пека.

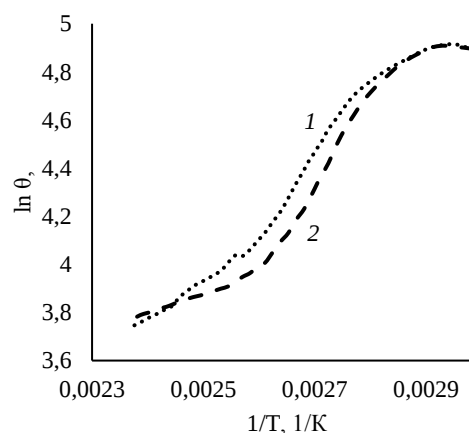


Рис. 4. Политерма смачиваемости в координатах Аррениуса
Fig. 4. Temperature dependence of the wetting edge angle in Arrhenius coordinates

Исходя из того, что процесс смачивания подчиняется кинетике 1 порядка, обработку кинетических кривых проводили, используя уравнение Аррениуса (1)

$$K = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

где K – константа скорости реакции 1 порядка; A – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации, кДж·моль⁻¹; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж·моль⁻¹·К⁻¹; T – температура процесса, К.

В координатах Аррениуса ($\ln \theta - 1/T$) для реакции 1-ого порядка политерма смачиваемости (рис. 4) преобразуется в ломанную линию с перегибами при температурах близких к 70, 90 и 120 °С. Точки перегибов соответствуют температуре размягчения (70 °С), температуре начала смачивания (90 °С) и температуре порядка 120 °С, после которой происходит замедление изменения краевого угла смачивания и начинается пропитка стержня.

Для прямолинейных областей вязко-текучего и жидкоподвижного состояния в координатах Аррениуса ($\ln \theta - 1/T$) были рассчитаны эффективные энергии активации ($E_{\text{эф}}$), характеризующие интенсивность протекания процесса. В начале смачивания лимитирующая стадия – хемосорбция между пеком и волокном, что обусловлено адсорбцией реагентов на поверхности стержня, их химическим превращением и десорбцией новых соединений. Здесь решающую роль играет наличие функциональных групп как в пеке, так и на твердой поверхности. Поскольку оба образца показывают близкие значения $E_{\text{эф}}$ и $T_{\text{нс}}$, можно предположить, что химия поверхности их также схожа, несмотря на различия исходных углеродных волокон разного производства (табл. 1). При минимальной вязкости

низкие значения $E_{\text{эф}}$ свидетельствуют об интенсификации процесса пропитки стержней, при этом диффузионные процессы превалируют над химическими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребность в интенсификации производства углерод-углеродных композиционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками требует глубокого понимания всех процессов, протекающих при взаимодействии углеродных волокон и пековой матрицы, поскольку именно смачиваемость и адгезия наполнителя и связующего определяют глубину пропитывания армирующих каркасов и выход на требуемые прочностные свойства УУКМ. В ходе комплексного исследования свойств исходных углеродных волокон на основе различных ПАН-прекурсоров и процесса смачиваемости каменноугольным пеком углеродных стержней на основе данных волокон установлено, что модификация поверхности органическим аппретом нивелирует вклад дефектов поверхности, вносимых на стадии производства волокон. Расчетные энергии активации позволяют вынести предположения о характере протекания процессов смачивания и пропитки. Таким образом, подбор аппрета, совместимого с материалом матрицы, является важным фактором, определяющим взаимодействие наполнителя и связующего и позволяющим повышать технологичность производства УУКМ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников С.А., Максимова Д.С. Формирование физико-механических характеристик углерод-углеродных материалов при изостатической технологии получения углеродной матрицы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 50-61. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.14y.
2. Антанович А.А., Колесников С.А., Максимова Д.С. Особенности процесса пропитки четырехмерных каркасов при изготовлении углерод-углеродных композиционных материалов. *Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2022. Вып. 5. С. 33–36. DOI: 10.31857/S102809602205003X.
3. Hou Xiao, Cheng Wen, Chen Ni, Zhou Hong-ying. Preparation of a high performance carbon/ carbon composite throat insert woven with axial carbon rods. *New Carbon Mater.* 2017. V. 28. N 5. P. 355-362. DOI: 10.1016/S1872-5805(13)60088-8.
4. Насибуллин А.В., Антипов Е.А., Бейлина Н.Ю. Догадин Г.С., Макаров Н.А. Влияние модификации пека на

REFERENCES

1. Kolesnikov S.A., Maksimova D.S. Formation of physical and mechanical characteristics of carbon-carbon materials with isostatic technology for obtaining a carbon matrix. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 11. P. 50-61 (in Russian). DOI 10.6060/ivkkt.20186111.14y.
2. Antanovich A.A., Kolesnikov S.A., Maksimova D.S. Features of the impregnation process of four-dimensional frames in the manufacture of carbon-carbon composite materials. *Poverhnost'. Rentgen., Sinkhrotron. Neytron. Issled.* 2022. N 5. P. 33–36 (in Russian). DOI: 10.31857/S102809602205003X.
3. Hou Xiao, Cheng Wen, Chen Ni, Zhou Hong-ying. Preparation of a high performance carbon/ carbon composite throat insert woven with axial carbon rods. *New Carbon Mater.* 2017. V. 28. N 5. P. 355-362. DOI: 10.1016/S1872-5805(13)60088-8.
4. Nasibulin A.V., Antipov E.A., Bejlina N.Yu. Dogadin G.S., Makarov N.A. The effect of pitch modification on the density of carbon-carbon composite materials. *Novye*

- плотность углерод-углеродных композиционных материалов. *Новые огнеупоры*. 2017. Вып. 1. С. 63 – 66. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-1-63-66.
5. Колесников С.А. Технологическое обеспечение изготовления крупногабаритных конструкций из углерод-углеродных материалов. *Конструкции из композиц. матер.* 2017. Вып. 4. С. 18-27.
6. Антанович А.А., Колесников С.А. Изостатические технологии при изготовлении углеродных конструктивных материалов. Сб. тр. междунаро. симпоз.: Перспективные материалы и технологии. Витебск. 2017. Т. 1. 2017. С. 21-23.
7. Галлямова Р.Ф., Сафиуллин Р.Л., Докичев В.А. Нанесение TiO₂ покрытий на углеродные волокна с модифицированной поверхностью. *Вестн. Башкир. ун-та*. 2022. Т. 27. Вып. 2. С. 310-315. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.2.10.
8. Максимова Д.С., Колесников С.А., Антанович А.А. Анализ процесса пропитки каменноугольными пеками и карбонизации под давлением углерод-углеродного композиционного материала. 12 Междунаро. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Москва. 2020. С. 105-106.
9. Островский В.С., Стариченко Н.С. Каменноугольные пеки как связующие для углеродных материалов. *Кокс и химия*. 2016. Вып. 4. С. 30-33.
10. Попов Г.В., Лысова Г.Ф. Смачивающая способность пеков к поверхности периклаза. *Вестн. магистратуры*. 2014. Т. 37. Вып. 10. С. 4-6.
11. Островский В.С., Стариченко Н.С. Вязкость и смачивающая способность пеков. *Кокс и химия*. 2019. Вып. 4. С. 36-41.
12. Лысова Г.А., Боровик С.И. Кинетика смачивания плавящего периклаза каменноугольными пеками. *Новые огнеупоры*. 2016. Вып. 6. С. 39-42.
13. Насибуллин А.В., Антипов Е.А., Бейлина Н.Ю. Догадин Г.С., Макаров Н.А. Влияние введения наноматериалов на реологические свойства пека. *Новые огнеупоры*. 2017. Вып. 5. С. 43 - 47. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-5-43-47.
14. Попова Н.А., Мадоян А.М., Жигалова Е.А., Жигалов Д.В., Молоткова Н.Н., Лобанов Д.А., Степанов Г.В., Стороженко П.А. Влияние кремнийорганических соединений на прочностные свойства волокон из полиакрилонитрила и углеродных волокон на их основе. Сб. тр. 12 Междунаро. Конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Москва. 2020. С. 151-152.
15. Овчинников Е.В. Физико-механические характеристики углеродных волокон, модифицированных поверхностно-активными веществами. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. 2019. Т. 66. Вып. 3. С. 38 – 47.
16. Shornikova O.N., Malakho A.P., Kenigfest A.M., Kulakov V.V., Seleznev A.N., Avdeev V.V. Wetting of carbon fibers by coal-tar pitch melts. *Fibre Chem.* V. 44. N 4. P. 259 – 264. DOI: 10.1007/s10692-012-9442-4.
17. Трухинов Д.К., Лебедева Е.А., Иванова Е.В., Истомина Т.С., Астафьева С.А. Эффективность извлечения углеродного волокна методом низкотемпературного сольволиза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 4. С. 59-66. DOI: 10.6060/ivkkt.20256804.7162.
18. Сидорина А.И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор). *Тр. ВИАМ*. 2022. Т. 110. Вып. 4. С. 61-74. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74.
19. Ogneupory. 2017. N 1. P. 63 – 66 (in Russian). DOI: 10.17073/1683-4518-2017-1-63-66.
5. Kolesnikov S.A. Technological support for the manufacture of large-sized structures made of carbon-carbon materials. *Konstruktsii Kompozits. Mater.* 2017. N 4. P. 18-27 (in Russian).
6. Antanovich A.A., Kolesnikov S.A. Isostatic technologies in the manufacture of carbon structural materials. International symposium: Promising materials and technologies. Vitebsk. 2017. V. 1. 2017. P. 21-23.
7. Gallyamova R.F., Safiullin R.L., Dokichev V.A. Application of TiO₂ coatings on carbon fibers with a modified surface. *Vestn. Bashkir. Univ.* 2022. V. 27. N 2. P. 310-315 (in Russian). DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.2.10.
8. Maksimova D.S., Kolesnikov S.A., Antonovich A.A. Analysis of the process of impregnation with coal pitches and carbonation under pressure of a carbon-carbon composite material. 12 International Conference "Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technology". Moscow. 2020. P. 105-106 (in Russian).
9. Ostrovskiy V.S., Starichenko N.S. Coal pakes as binders for carbon materials. *Koks Khim.* 2016. N 4. P. 30-33 (in Russian).
10. Popov G.V., Lysova G.F. Wetting ability of pitches to the surface of the periclase. *Vestn. Magistratury*. 2014. V. 37. N 10. P. 4-6 (in Russian).
11. Ostrovskiy V.S., Starichenko N.S. Viscosity and wetting ability of pitches. *Koks Khim.* 2019. N 4. P. 36-41 (in Russian).
12. Lysova G.A., Borovik S.I. Kinetics of wetting of fused periclase with coal pitches. *Novye Ogneupory*. 2016. N 6. P. 39-42 (in Russian).
13. Nasibulin A.V., Antipov E.A., Bejlina N.Yu. Dogadin G.S., Makarov N.A. The effect of the introduction of nanomaterials on the rheological properties of pitch. *Novye Ogneupory*. 2017. N 5. P. 43 – 47 (in Russian). DOI: 10.17073/1683-4518-2017-5-43-47.
14. Popova N.A., Madoyan A.M., Zhigalova E.A., Zhigalov D.V., Molotkova N.N., Lobanov D.A., Stepanov G.V., Storozhenko P.A. Influence of organosilicon compounds on the strength properties of polyacrylonitrile fibers and carbon fibers based on them. 12 International Conference "Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technology". Moscow. 2020. P. 151-152 (in Russian).
15. Ovchinnikov E.V. Physical and mechanical characteristics of carbon fibers modified with surfactants. *Progressivnye Tekhnol. Sistemy Mashinostroeniya*. 2019. V. 66. N 3. P. 38 – 47 (in Russian).
16. Shornikova O.N., Malakho A.P., Kenigfest A.M., Kulakov V.V., Seleznev A.N., Avdeev V.V. Wetting of carbon fibers by coal-tar pitch melts. *Fibre Chem.* V. 44. N 4. P. 259 – 264. DOI: 10.1007/s10692-012-9442-4.
17. Trukhinov D.K., Lebedeva E.A., Ivanova E.V., Istomina T.S., Astaf'eva S.A. Efficiency of carbon fiber extraction by low-temperature solvolysis. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 4. P. 59-66 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256804.7162.
18. Sidorina A.I. Modification of the surface of carbon reinforcing fillers for polymer composite materials by electrochemical treatment (review). *Tr. VIAM*. 2022. V. 110. N. 4. P. 61-74 (in Russian). DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74
19. Garifullin A.R., Abdullin I.Sh., Israfilov I.H. Increasing the adhesive properties of carbon fiber-based composites by high-frequency discharge at low pressure. *Vestn. Tekhnol. Univ.* 2015. V. 18. N 17. P. 169-170 (in Russian).
20. Gubanov A.A., Korshak Yu.V., Vagramyan T.A., Plyushchij I.V. Electropolymerization of aniline and pyrrole on the

19. **Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш., Ибрафиллов И.Х.** Повышение показателей адгезионных свойств компози- тов на основе углеродных волокон высокочастотным разрядом при пониженном давлении. *Вестн. Технол. ун- та*. 2015. Т. 18. Вып. 17. С. 169-170.
20. **Губанов А.А., Коршак Ю.В., Ваграмян Т.А., Плющий И.В.** Электрополимеризация анилина и пиррола на по- верхности углеродного волокна. *Усп. в химии и хим. тех- нологии*. 2014. Т. 28. Вып. 5 (154). С. 109-110.
21. **Вербец Д.Б., Бучнев Л.М., Данилов Е.А., Смыслов А.И., Эйсмонт З.В., Сергеев Д.В.** Изучение морфологи- ческих изменений ПАН-волокон при переработке в угле- родные волокна, влияние температуры термообработки на морфологические изменения углеродных волокон. Поиск взаимосвязи морфологических изменений с проч- ностными характеристиками. Сб. Тр. 9 Международ. Конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, ма- териаловедение, технология». Москва. 2014. С. 95-96.
22. **Морозов С.В., Ананьин С.В.** Влияние модификации поверхности углеродных волокон на физико-механиче- ские характеристики углепластиков. *Ползунов. вестн.* 2022. Вып. 1. С. 134–138. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.018.
23. **Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я.** Разработка и исследова- ние аппретирующих составов для термопластичных углепластиков *Тр. ВИАМ*. 2016. № 12(48). С. 9. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9.
24. **Меньшова И.И., Аверина Ю.М., Заболотная Е.** Угле- родные волокна в адсорбционных процессах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 3. С. 52-58. DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6715.
25. **Qiu S., Fuentes C.A., Zhang D.X., Van Vuure A.W., Sev- eno D.** Wettability of Carbon Fibers at the Microscale. Con- ference: The Fiber Society's 2016 Spring Technical Confer- ence. Mulhouse, France. 2016.
26. **Мизитов Е.Л., Бейлина Н.Ю.** Псевдоизотропные коксы разной природы исходного сырья: Структурные особен- ности и их влияние На взаимодействие с каменноуголь- ным пеком, Его компонентами и иными агентами. Сб. тр. 9 Международ. Конф. «Углерод: фундаментальные про- блемы науки, материаловедение, технология». Москва. 2014. С. 294-296.
27. **Шапагин А.В.** Методики физико-механических и адге- зионных исследований углеродных волокон и их смачи- ваемости связующими. Сб. тр. Институт физической хи- мии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН - 90 лет. Москва: Ин-т физ. химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН. 2019. С. 54-55.
- surface of carbon fiber. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 28. N 5 (154). P. 109-110 (in Russian).
21. **Verbets D.B., Buchnev L.M., Danilov E.A., Smyslov A.I., Eismont Z.V., Sergeev D.V.** Study of morphological changes in PAN fibers during processing into carbon fibers, the effect of heat treatment temperature on morphological changes in carbon fibers. Search for the relationship of morphological changes with strength characteristics 9 International Conference "Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technol- ogy". Moscow. 2014. P. 95-96 (in Russian).
22. **Morozov S.V., Anan'in S.V.** The effect of modification of the surface of carbon fibers on the physical and mechanical charac- teristics of carbon fiber plastics. *Polzunov. Vestn.* 2022. N 1. P. 134–138 (in Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.018.
23. **Petrova G.N., Bejder E.Ya.** Development and research of applying formulations for thermoplastic carbon fiber plastics. *Tr. VIAM*. 2016. N 12(48). P. 9. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9.
24. **Menshova I.I., Averina Y.M., Zabolotnaya E.** Carbon fi- bers in the adsorption processes *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 3. P. 52-58 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6715.
25. **Qiu S., Fuentes C.A., Zhang D.X., Van Vuure A.W., Sev- eno D.** Wettability of Carbon Fibers at the Microscale Confe- rence: The Fiber Society's 2016 Spring Technical Confer- ence. Mulhouse, France. 2016.
26. **Mizitov E.L., Beilina N.Yu.** Pseudoisotropic cokes of dif- ferent nature of the feedstock: Structural features and their effect on interaction with coal tar, its components and other agents. 9 International Conference "Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technology". Mos- cow. 2014. P. 294-296 (in Russian).
27. **Shapagin A.V.** Methods of physico-mechanical and adhe- sive studies of carbon fibers and their wettability with binders / A.V. Shapagin. Collection of tr. Frumkin Institute of Phys- ical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Acad- emy of Sciences - 90 years. Moscow: A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences. 2019. P. 54-55 (in Russian).

Поступила в редакцию 09.01.2025

Принята к опубликованию 26.05.2025

Received 09.01.2025

Accepted 26.05.2025