

Научная статья

УДК 66.022

EDN OXJMQT

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-4-66-14-20>

Михаил Иванович Панин¹

Артур Радикович Гареев²

Андрей Андреевич Слюсарев³

Олег Игоревич Кулаков⁴

Татьяна Александровна Соболева⁵

^{1,2,3,5}АО «НИИГрафит», Москва, Россия

⁴Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

¹MPanin@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6513-6767>

²ARgareev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5934-8456>

³AASlyusarev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9552-697X>

⁴kulakov@imash.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1716-2180>

⁵TatyAleSoboleva@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9712-0342>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР КАРКАСНЫХ ТКАНЕЙ И ИГЛОПРОБИВНЫХ ПОЛОТЕН, ВЫПОЛНЕННЫХ В ВИДЕ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ

Аннотация. Рассмотрены вопросы проектирования структур текстильных заготовок из углеродных материалов, предназначенных для производства углерод-углеродных (УУКМ) тормозных дисков для авиационной промышленности, формируемых на базе каркасных тканей и иглопробивных нетканых полотен. Проведен обзор качественных параметров тканей и иглопробивных нетканых полотен, влияющих на свойства получаемого композиционного материала. Установлено, что структура каркасных тканей и процесс формирования на их основе иглопробивных нетканых полотен существенно влияют на качество заготовок и, как следствие, на прочностные и эксплуатационные свойства углерод-углеродных тормозных дисков. Установлено, что применение ткани с поверхностной плотностью 400 г/м² для создания УУКМ на основе иглопробитых каркасов в сравнении с образцами на основе ткани с поверхностной плотностью 600 г/м² позволяет увеличить объемную долю волокна, уменьшить пористость в композите. При использовании ткани с поверхностной плотностью 400 г/м² существенно увеличивается относительная доля длинномерных пор, что свидетельствует о увеличении суммарной площади поверхности раздела на границе фаз.

Ключевые слова: тормоз, углеродный композит, углеродное волокно, матрица, иглопробивное полотно, структура композита

Для цитирования. Исследование структур каркасных тканей и иглопробивных полотен, выполненных в виде заготовок для производства углерод-углеродных тормозных дисков / М. И. Панин, А. Р. Гареев, А. А. Слюсарев, О. И. Кулаков, Т. А. Соболева // Технологии и качество. 2024. № 4(66). С. 14–20. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-4-66-14-20>.

Original article

Mikhail I. Panin¹

Artur R. Gareev²

Andrey A. Slyusarev³

Oleg I. Kulakov⁴

Tatiana A. Soboleva⁵

^{1,2,3,5}JSC “Scientific research institute of graphite”, Moscow, Russia

⁴Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

STRUCTURES OF REINFORCING FABRICS AND NEEDLE-PUNCHED CLOTH MADE AS PREFORMS FOR THE CARBON-CARBON BRAKE DISCS MANUFACTURING

© Панин М. И., Гареев А. Р., Слюсарев А. А., Кулаков О. И., Соболева Т. А., 2024

Abstract. *The issues of designing structures of textile blanks made of carbon materials and intended for production of carbon-carbon brake discs for the aviation industry formed on the basis of frame fabrics and needle-punched nonwoven fabrics, are reviewed. Qualitative parameters of the fabrics and needle-punched nonwoven fabrics, affecting the properties of the resulting composite material, are reviewed. It is established that the structure of frame fabrics and the process of formation of needle-punched nonwoven fabrics on their basis, is what the quality of blanks significantly depends on; that also has an indirect impact on the strength and operational properties of carbon-carbon brake discs. It is established that the use of fabric with a surface density of 400 g/m² to create carbon-carbon composite materials based on needle-punched frames, compared to samples based on fabric with a surface density of 600 g/m², allows increasing the volume fraction of fibre, reducing porosity in the composite. Using fabric with a surface density of 400 g/m² the relative proportion of long dimension pores significantly increases, indicating an increase in the total surface area at the phase boundary.*

Keywords: brake, carbon composite carbon fabric, needle-punching, cloth, structure, matrix

For citation: Panin M. I., Gareev A. R., Slyusarev A. A., Kulakov O. I., Soboleva T. A. Structures of reinforcing fabrics and needle-punched cloth made as preforms for the carbon-carbon brake discs manufacturing. *Technologies & Quality*. 2024. No 4(66). P. 14–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-4-66-14-20>.

Проведенные ранее исследования, содержание которых отражено в патенте [1], показывают, что использование толстостенных текстильных заготовок из углеродных материалов является основой для производства фрикционных материалов, применяемых в тяжело нагруженных узлах трения машин и механизмов. Современные тормозные системы имеют сложную конструкцию, состоящую из отдельных дисков, каждый из которых должен выполнять свою функцию. Так, в конструкции тормозной системы предусматривают вращающиеся и неподвижные тормозные диски, которые, кроме конструктивных особенностей, должны обладать и трибологическими свойствами, т. е. устойчивостью к изменению структурно-фазовых состояний в поверхностных слоях композита, возникающих под действием силы трения. Учитывая высокие требования, предъявляемые к фрикционным материалам в настоящее время, тормозные системы для авиационной промышленности изготавливаются преимущественно набором дисков из углеродных материалов на базе текстильных технологий с использованием углеродных волокон, нетканых полотен, тканей, намоток, трикотажа и т. д. Главная задача при этом заключается в создании заготовок с максимальным и равномерным заполнением объема структуры углеродным материалом и заданной ориентацией углеродных волокон относительно рабочей фрикционной поверхности диска [2].

Базой для формирования заготовок тормозных дисков высокой прочности и требуемых свойств из углеродных волокон [3–6] являются иглопробивные тканые и нетканые полотна. Структура таких полотен определяется свойствами применяемых каркасных тканей, которые мо-

гут иметь заданные параметры: по виду переплетения, плотности ткани по основе и утку, а также по структуре применяемых нитей (их линейной плотности, числу филаментов), определяющие коэффициенты заполнения основы и утка.

Первым этапом создания заготовок для тормозных дисков является выбор структуры каркасных тканей. Очевидно, что структура каркасных тканей, в первую очередь, должна проектироваться как равноплотная ткань, обеспечивающая при больших физико-механических воздействиях на нее равномерное распределение прилагаемых нагрузок на всю структуру тормозного диска. Равноплотная структура каркасных тканей обеспечивает более равномерное внедрение в ее структуру углеродного волокнистого иглопробивного наполнителя и пекового связующего. Необходимо учитывать то, что совершенно разные по структуре ткани могут иметь одинаковую проницаемость, которая зависит от площади пор между нитями основы и утка, структуры самих нитей, толщины вырабатываемой ткани, вида переплетения и т. д.

Для изготовления заготовок тормозных дисков из углеродных нитей чаще всего используются каркасные ткани главных переплетений – полотняного, сатинового и саржевого. Данные виды переплетений могут использоваться в одном пакете и в разных слоях заготовки. Названные переплетения показаны на рисунке 1.

Используя в структуре заготовок каркасных тканей различные переплетения или выкладывая их «лицом» и «изнанкой» друг на друга, можно добиваться формирования термостабилизирующего слоя, состоящего из разнонаправленных и неоднородных настилов моноволокон, который позволяет осуществить более быстрый отвод тепла из области трения в объем диска.

Вторым этапом создания заготовок для тормозных дисков является изготовление иглопробивных полотен на базе выбранных каркасных тканей.

Суть иглопробивного способа изготовления нетканого полотна заданной плотности заключается в прокалывании и закреплении углеродных штапельных волокон в структуре каркасной ткани, раскроенной в размер заготовок тормозных дисков. Этот процесс осуществляется на иглопробивных машинах путем механического воздействия на волокна специальными иглами с зубринами, направленными в сторону острия игл. Иглы с зубринами при иглопрокалывании каркасных тканей должны свободно проникать между филаментами, погружая штапельные волокна в структуру заготовки без разрушения самих нитей. При многократном иглопрокалывании волокнистого холста его волокна сцепляются не только с нитями отдельного слоя каркасной ткани, но и перепутываются между волокнами всех слоев заготовки, создавая объемный материал высокой плотности и прочности. Формируемая структура иглопробивного нетканого полотна характеризуется большим количеством вертикально расположенных волокон и хаотично расположенных пор, что способствует свобод-

ному удалению из нее влаги и более равномерному проникновению пекового связующего вглубь заготовки. Следует также отметить, что не все волокна смесового холста располагаются строго вертикально (перпендикулярно плоскости каркасных тканей), часть волокон располагается под некоторым углом, что может способствовать рассеянию тепловой энергии в структуре тормозного диска.

Целью данной работы является исследование параметров плотности материала, пористости структуры, соотношения компонентов и технологических процессов армирования УУКМ 2,5D структурами с различным наполнением и направлением армирующих волокон, формируемых на базе иглопробивных тканых и нетканых полотен.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования были выбраны образцы 2,5D углерод-углеродных тормозных дисков на основе ткани Т600 для образцов 1 и 2 и ткань УТР 610-12-400П для образца 3. Образец 1 предварительно пропитан фенолформальдегидной смолой. Образцы 2 и 3 предварительную пропитку фенолформальдегидным связующим не проходили.

Характеристики тканей и нитей образцов приведены в таблице 1.

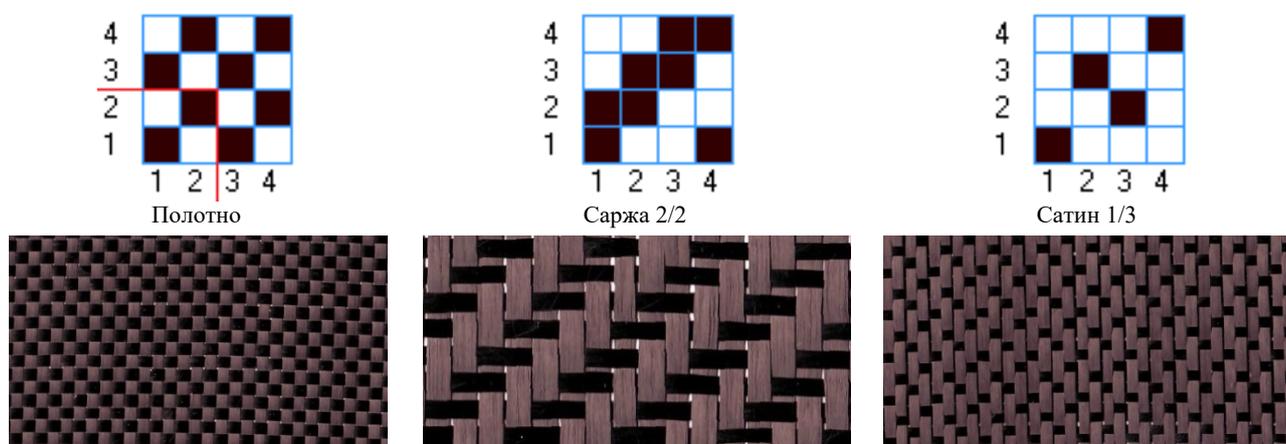


Рис. 1. Схемы переплетения и внешний вид каркасных тканей (полотно, саржа 2/2, сатин 1/3)

Параметры исходных тканей для изготовления образцов из 2,5D УУКМ

Т а б л и ц а 1

Показатель	Образец	
	3	1 и 2
Ткань	УТР 610-12-400П	Т600
Поверхностная плотность, г/м ²	400 ± 20	600 ± 20
Количество нитей основы на 10 см, шт.	25 ± 2	39 ± 2
Количество нитей утка на 10 см, шт.	25 ± 2	39 ± 2
Переплетение	Полотно	Саржа 2/2
Используемая нить	Т700, 12К	SYT 45S, 12К
Филаментарная прочность, ГПа	4,9	4,5
Модуль упругости, ГПа	230	230
Плотность волокна, г/см ³	1,79	1,79

Армирующие каркасы для изготовления образцов 1, 7 и Т были получены с помощью иглопробивки. Для получения конечного материала их подвергли предварительной пропитке среднетемпературным пеком, а затем циклам уплотнения и высокотемпературной термообработки [7]: вакуумная заливка среднетемпературным пеком – пропитка и карбонизация под давлением – высокотемпературная термообработка в электровакуумной печи.

Для проведения исследований сформированных структур заготовок тормозных дисков применяли метод оптической микроскопии с помощью микроскопа «Микромед ПОЛАР 3». В качестве образцов использовали шлифы УУКМ.

Результаты исследования. Исследование объемного заполнения и пористости УУКМ на основе равноплотных иглопробивных текстильных структур проводилось за счет определения пористости образцов, а также их конфигурации методом оптической микроскопии.

На рисунках 2, 3 и 4 представлены микрофотографии структур образцов 1, 7 и Т, соответственно, которые использовали для расчета долей пор и пористости этих образцов.

На снимках можно наблюдать структурные составляющие УУКМ: углеродное волокно на снимке имеет светло-серый цвет, углеродная матрица темно-серого цвета. Микропоры имеют

черный цвет и представлены на снимке вместе с линейными размерами.

По форме волокна можно увидеть, что на снимках образцов 1 и 7 волокно преимущественно находится под небольшим относительно перпендикуляра углом к плоскости шлифа, в то время как на снимке образца Т волокно почти параллельно плоскости шлифа.

С помощью оптической микроскопии определены формы пор, их размеры и площадь [8]. Найденные поры можно разделить на сферические, которые находятся в слоях матрицы, и на длинномерные, которые находятся на границе волокно – матрица. Данные обработаны в программе ImageJ. Результаты расчета пористости и объемных долей образцов представлены в таблицах 2 и 3.

Анализ данных таблиц 2 и 3 показывает, что характер и количество пор в структуре углерод-углеродного композиционного материала напрямую зависит от ряда факторов, а именно от исходного объемного заполнения волокном общего объема композита, а также от структуры армирующего компонента [9, 10].

Увеличение плотности композита в первую очередь позволяет уменьшить количество пор в слоях матрицы [11], но лишь незначительно снизить пористость материала на границе раздела фаз волокно – матрица, что является одной из основных причин расслоения УУКМ.

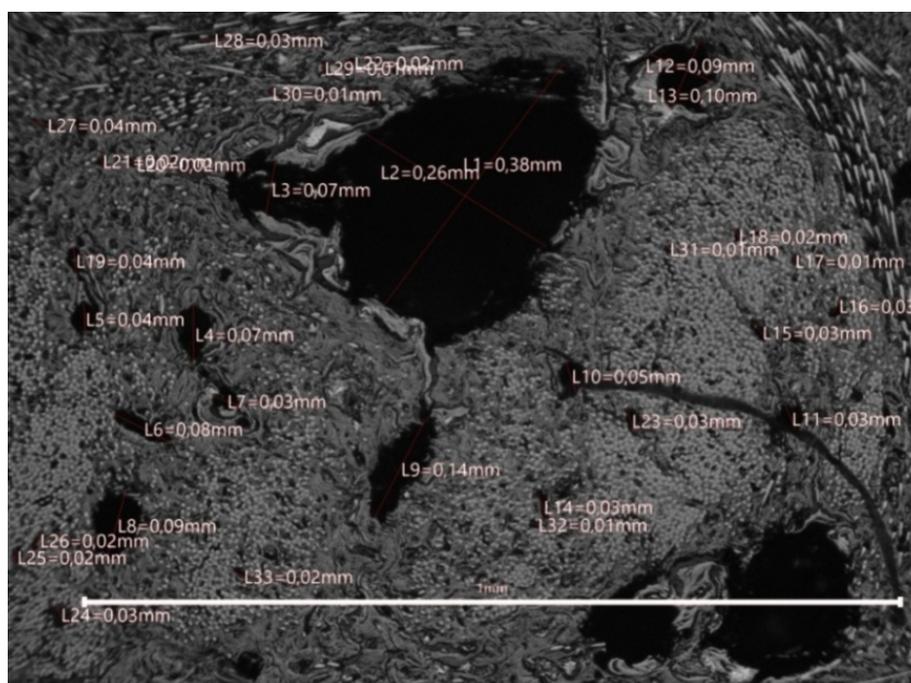


Рис. 2. Образец 1

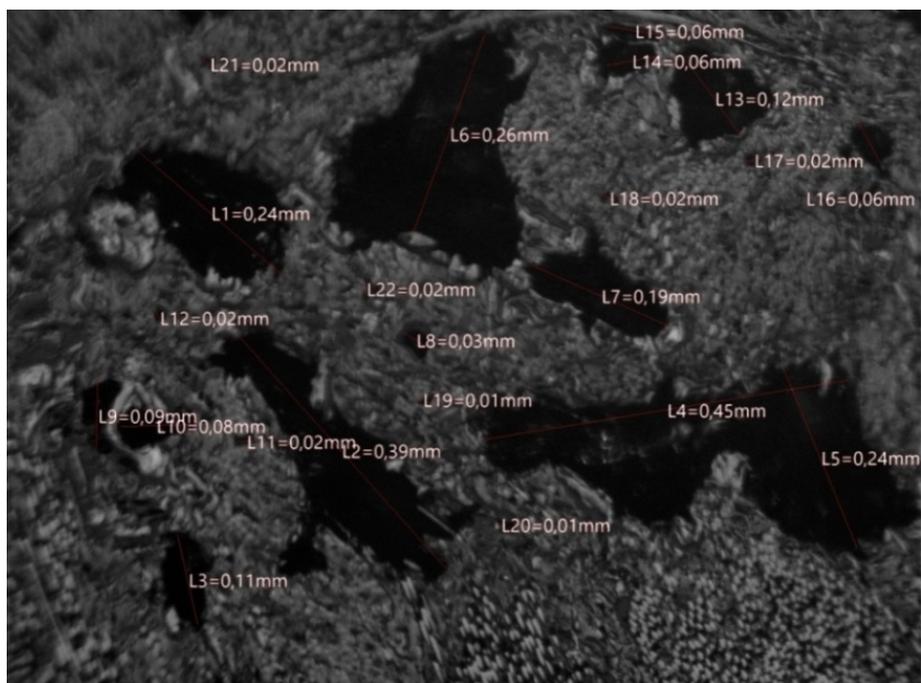


Рис. 3. Образец 2

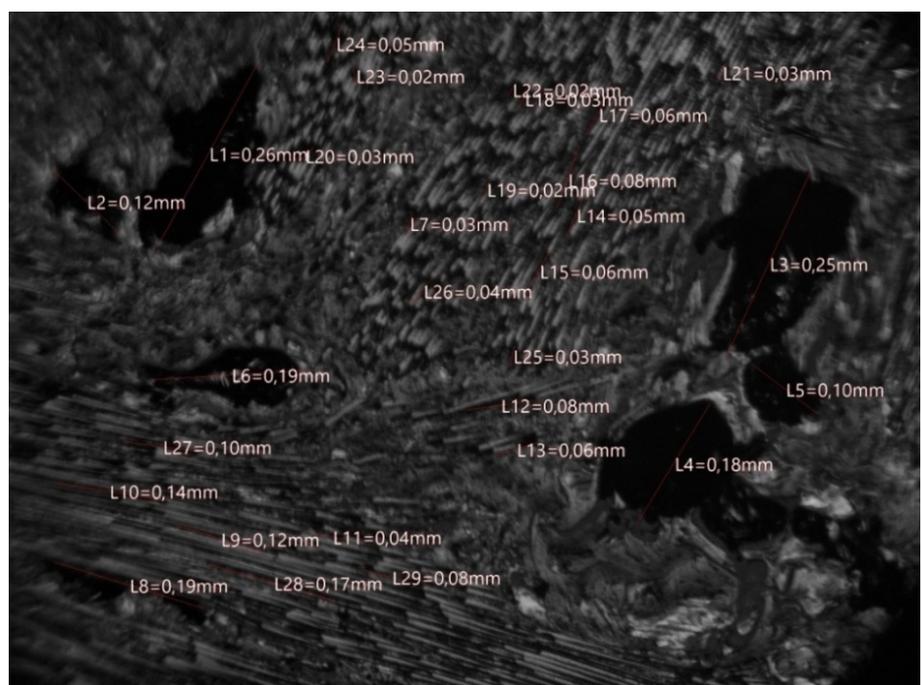


Рис. 4. Образец 3

ВЫВОДЫ

1. Применение ткани с поверхностной плотностью 400 г/м^2 для создания УУКМ на основе иглопробитых каркасов в сравнении с образцами на основе ткани с поверхностной плотностью 600 г/м^2 позволяет увеличить объемную долю волокна, уменьшить пористость в композите.

2. При использовании ткани с поверхностной плотностью 400 г/м^2 существенно увеличивается относительная доля длинномерных пор,

что свидетельствует о увеличении суммарной площади поверхности раздела на границе фаз.

3. Дальнейшее развитие структур фрикционных композиционных материалов и совершенствование технологических процессов их изготовления должно быть направлено на изыскание способов увеличения коэффициента заполнения композита наполнителем и более равномерного распределения матрицы в объеме заготовок.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета пористости и объемных долей компонентов материала

Показатель	Номер образца		
	1	2	3
Плотность, г/см ³	1,74	1,73	1,76
Открытая пористость, %	11,6	12,3	10,7
Пористость, определенная с помощью оптической микроскопии, %	12,99	16,23	10,21
Объемная доля волокна, %	45,11	44,36	48,63
Объемная доля матрицы, %	41,90	39,41	41,16

Т а б л и ц а 3

Относительная доля пор в образцах на снимках, %

Номер образца	Сферические поры в слоях матрицы	Длинномерные поры (расслоение на границе раздела)
1	30,01	69,99
2	34,44	65,56
3	20,87	79,13

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. РФ № 2820117 Российская Федерация. Способ изготовления волокнистого армирующего каркаса для углерод-углеродных тормозных дисков. Заявка № 2023122481, опубл.: 29.05.2024 / Гареев А. Р., Карпов А. П., Панин М. И., Корчинский Н. А., Слюсарев А. А. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИГрафит».
2. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты : монография. СПб. : Научные основы и технологии, 2009. 379 с.
3. Пат. SU 1811568A3. МПК F16D 69/00. Углеродный фрикционный диск : № 5002539 : заявл. 01.08.1991 : опубл. 23.04.1993, Бюл. № 15(71) / В. И. Костиков, Т. Е. Голубкова, А. Ю. Орлов, В. В. Кулаков ; заявитель и патентообладатель государственный научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита. 4 с.
4. Оценка технического состояния объектов, работающих под давлением, при ограниченном доступе к поверхности с использованием метода акустической эмиссии / А. И. Гневко, О. Е. Зубов, С. В. Гразион, М. В. Мукомела, В. А. Кобзев // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 217(7). С. 27–35.
5. Углеродные волокна : пер. с яп. / С. Симамура, А. Синдо, К. Коцука [и др.] ; под ред. С. Симамуры. М. : Мир, 1987. 304 с.
6. Конкин А. А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. М. : Химия, 1974. 375 с.
7. Углеродные волокна и углекомпозиаты : пер. с англ. / Э. Фитцер, Р. Дифендорф, И. Калнин [и др.] ; под ред. Э. Фитцера. М. : Мир, 1988. 336 с.
8. Материаловедение : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин, Н. М. Рыжов ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 646 с.
9. Комарова Т. В. Получение углеродных материалов : учеб. пособие / РХТУ им. Д. И. Менделеева. М., 2001. 94 с.
10. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М. : САЙНС-ПРЕСС, 2007. 192 с.
11. Новиков В. У., Кобец Л. П., Деев И. С. Исследование углеродных волокон с использованием мультифрактального формализма // Пластические массы. 2004. № 2. С. 15.

REFERENCES

1. Gareev A. R., Karpov A. P., Panin M. I., Korchinsky N. A., Slysarev A. A. Method of manufacturing of fibre reinforcing frame for carbon-carbon brake discs. Russian Federation Patent No. 2820117. Application No. 2023122481, publ.: 29.05.2024 ; applicant and patentee JSC “NIIGraphite”. (In Russ.)
2. Perepelkin K. E. Reinforcing fibres and fibrous polymer composites. Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2009. 379 p. (In Russ.)
3. Kostikov V. I., Golubkova T. E., Orlov A. Y., Kulakov V. V. Carbon friction disc. Cop. certificate No. 1811568 USSR, MPK F16D 69/00. No. 5002539 : applied. 01.08.1991 : published on 23.04.1993,

- Bulletin № 15(71); *Gosudarstvenny`j nauchno-issledovatel`skij institut konstrukcionny`x materialov na osnove grafita* (Applicant State Scientific Research Institute of Structural Materials Based on Graphite). 4 p. (In Russ.)
4. Gnevko A. I., Zubov O. E., Grazion S. V., Mukomela M. V., Kobzev V. A. Pressurised objects technical condition evaluation with limited access to surface using acoustic emission method. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation Higt Technologies]. 2015;217(7):27–35. (In Russ.)
 5. Shimamura S. (ed.), Sindo A., Kocuka K. [et al.]. *Carbon Fibres*. Moscow, Mir Publ., 1987. 304 p. (In Russ.)
 6. Konkin A. A. *Carbon and other heat-resistant fibre materials*. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 375 p. (In Russ.)
 7. Fitzer E. (ed.), Difendorf R., Kalnin I. [et al.]. *Carbon Fibres and Carbon Composites*. Moscow, Mir Publ., 1988. 336 p. (In Russ.)
 8. Arzamasov B. N. (ed.), Makarova V. I., Mukhin G. G. (ed.), Ryzhov N. M. *Materials science*. 3rd edition, revised and supplemented. Moscow, Bauman Moscow St. Tech. Univ. Publ., 2001. 646 p. (In Russ.)
 9. Komarova T. V. *Preparation of carbon materials*. Moscow, Mendeleev Univ. of Chemical Technology of Russia Publ. Moscow, 2001. 94 p.
 10. Meleshko A. I., Polovnikov S. P. *Carbon, Carbon fibers, Carbon composites*. Moscow, Sayns-press Publ. 2007. 192 p. (In Russ.)
 11. Novikov V. U., Kobec L. P., Deev I. S. The study of carbon fibers using a multifractal formalism. *Plasticheskie massy* [Plastic masses]. 2004;2:15. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 9.09.2024
Принята к публикации 30.10.2024