CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-5-13

УДК 677.024.5

УСТОЙЧИВОСТЬ УГЛЕВОЛОКНИСТОГО ВОЙЛОКА «КАРБОПОН-В-22» К ОКИСЛЕНИЮ

В. А. ЛАБУНОВ[1], А. В. ГУСИНСКИЙ[1], Н. А. ПЕВНЕВА[1], В. Н. РОДИОНОВА[1], М. М. КАСПЕРОВИЧ[1], И. А. КАШКО[1], О. В. ТАНАНА[2]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)
[2]Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (Новополоцк, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлены результаты исследования устойчивости углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22», активно используемого в качестве высокоэффективных широкополосных экранов электромагнитных излучений и радиопоглощающих материалов, к окислению при воздействии молекулярного кислорода в течение семи лет хранения при комнатной температуре. Исследованы образцы войлока, отожженные при температурах от 600 до 720 °С, для получения поверхностного сопротивления материала «Карбопон-В-22» от 1100 до 100 Ом. Отмечено увеличение в 1,7–1,8 раза поверхностного сопротивления по сравнению с первоначальным значением. Полученные данные о долговременной стабильности и надежности свойств материала «Карбопон-В-22» могут способствовать новым исследованиям и разработкам при его применении в различных областях.

Ключевые слова: углеродные волокна, поверхностное сопротивление углеродных волокон, радиопоглощающие материалы, сверхвысокие частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Устойчивость углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» к окислению / В. А. Лабунов [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 5–13. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-5-13.

OXIDATION RESISTANCE OF CARBON FIBER FELT “CARBOPON-B-22”

VLADIMIR A. LABUNOV[1], ALEXANDER V. GUSINSKY[1], NATALIA A. PEVNEVA[1], VALENTINA N. RODIONOVA[1], MARINA M. KASPEROVICH[1], IVAN A. KASHKO[1], OLGA V. TANANA[2]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
[2]Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of a study of the resistance of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”, actively used as highly effective broadband electromagnetic radiation screens and radio-absorbing materials, to oxidation under the influence of molecular oxygen during seven years of storage at room temperature. Felt samples annealed at temperatures from 600 to 720 °C were studied to obtain the surface resistance of the material “Carbopon-B-22” from 1100 to 100 Ohm. An increase of 1.7–1.8 times in surface resistance compared to the initial value was noted. The obtained data on the long-term stability and reliability of the properties of the material “Carbopon-B-22” can contribute to new research and development in its application in various fields.

Keywords: carbon fibers, surface resistance of carbon fibers, radio-absorbing materials, ultra-high frequencies.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Labunov V. A., Gusinsky A. V., Pevneva N. A., Rodionova V. N., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Tanana O. V. (2025) Oxidation Resistance of Carbon Fiber Felt “Carbopon-B-22”. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 5–13. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-5-13 (in Russian).

Введение

Научно-технический прогресс, обусловленный эффективным использованием достижений электроники, радиотехники, вычислительной техники, во многом оказался возможным благодаря уровню и темпам исследований в области создания материалов для этих отраслей техники, в том числе высокоэффективных широкополосных экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) и радиопоглощающих покрытий [1]. Разработка новых материалов для решения проблемы электромагнитной совместимости становится весьма актуальной в связи с развитием и увеличением мощности устройств СВЧ-радиоэлектроники, поскольку возникающее при их работе электромагнитное излучение на частотах высших типов гармоник создает значительные помехи радиоэлектронной аппаратуре и спутниковой связи. Существенное уменьшение взаимных помех в передающих и приемных трактах устройств, работающих в СВЧ-диапазоне, возможно за счет применения радиопоглощающих материалов (РПМ) нового поколения, обеспечивающих расширение функциональных и тактико-технических возможностей электронных средств [2], предохраняющих от обнаружения различные объекты [3]. Для практического внедрения новых РПМ необходимо исследовать комплекс электрофизических параметров, таких как отражение и поглощение электромагнитных волн в материале, диэлектрическая постоянная, тангенс угла диэлектрических потерь, нелинейная восприимчивость второго и третьего порядков, долговременная стабильность характеристик материалов [4].

В настоящее время в конструкциях экранов ЭМИ [5, 6], в композитных экранирующих и радиопоглощающих материалах [7, 8] широко применяются углеродные волокна, обладающие высокими механической прочностью и электропроводностью. Важным фактором для выбора в качестве поглотителей ЭМИ углеродных волокон является то, что обнаружен эффект аномально большого поглощения ЭМИ очень тонкими проводящими волокнами. Такой эффект наблюдается, когда на волокно падает электромагнитная волна, электрический вектор которой параллелен оси волокна. Эффективный диаметр волокна в данном случае в несколько сотен раз превышает его геометрический диаметр. Это размерный эффект, природа которого связана, скорее всего, с возбуждением токов при определенных соотношениях между эффективным диаметром волокна и длиной волны ЭМИ [9, 10].

Несмотря на достоинства углеродных волокон, у них есть существенный недостаток – окисление за счет молекулярного кислорода в течение определенного времени, что приводит к увеличению их волнового сопротивления. Кинетика окисления углеродных волокон различных типов исследована лишь в малом числе работ [11, 12].

Углеродные волокна для электромагнитного экранирования

Наиболее перспективным материалом для создания экранов ЭМИ являются тонкие проводящие углеродные волокна, получаемые высокотемпературной обработкой органических волокон, при которой происходит переход к углеродному волокну. Одновременно изменяются физико-химические и механические свойства материала.

При промышленном производстве углеродных волокон чаще всего используют нити из полиакрилонитрильных (ПАН) волокон, пеков и гидратцеллюлозных (ГЦ) волокон. Для изготовления композиционных материалов конструкционного назначения применяются углеродные нити из ПАН волокон, характеризующиеся высокой прочностью и жесткостью (модулем упругости) [13]. Углеродные волокна из ГЦ, которые обладают более низкими значениями прочности и модуля упругости, используют как теплозащитные, фильтрующие, сорбирующие, электрорезистивные и РПМ. Главные характеристики углеродных нитей из ГЦ – высокая удельная поверхность, пористая структура, сорбционная способность, электрическая проводимость и диэлектрические свойства. Они могут перерабатываться в объемные текстильные структуры – ткани и вязаные полотна, в которых нити образуют объемные переплетения, так как в отличие от углеродных нитей из ПАН и пеков нити из ГЦ не являются хрупкими.

Впервые получение и применение углеродных волокон (в качестве нитей накаливания в электрических лампах) было предложено и запатентовано известным американским изобретателем Т. Эдисоном в 1880 г. Создание углеродного волокна из искусственных волокон способствовало его активному практическому применению. Для получения углеродных волокон

исследовались почти все типы химических и природных волокон: в качестве исходного сырья использовались волокна на основе алифатических и ароматических полиамидов, ароматических полиэфиров, гетероциклических термостойких полимеров, полиэтилена и др. В настоящее время используют: целлюлозное волокно – неплавкое и не требующее окисления; полиакрилонитрильное, из которого вырабатывается основная масса углеродного волокна с большим ассортиментом свойств; пековые волокна, из которых вырабатываются самые дешевые и самые дорогие волокна. Возможно применение и других исходных волокон, например, поливинилхлоридных, полиоксазольных, но они не имеют промышленного значения из-за сложной технологии изготовления, низкого качества и высокой стоимости получаемых углеродных волокон. Сегодня углеродные волокна производят в основном из вискозных и ПАН волокон.

Углеродные волокна (УВ) (к которым относится и углеволокнистый войлок «Карбопон-В-22») получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются преимущественно атомы углерода. При температуре обработки ниже 1000 °С такие волокна содержат 85–90 % углерода (карбонизированные УВ), при 1000–1500 °С – 95–99 % (угольные УВ), при 1500–3000 °С – более 99 % (графитизированные УВ). Углеродные волокна первоначально получали по технологии, применяемой при синтезе стеклоуглерода. В настоящее время наиболее распространенный способ – пиролиз и последующая высокотемпературная обработка полимерных волокон. Волокнистую форму изделию придают на стадии предварительной обработки, а при пиролизе эта форма уже не изменяется. Огнестойкость волокна приобретают за счет окисления в воздушной среде, частичного дегидрирования, межмолекулярного сшивания и других процессов. При этом повышается стойкость волокон к плавлению при прогревании и сдерживается чрезмерное удаление атомов углерода. В процессе карбонизации по мере роста температуры происходят газификация и удаление всех атомов органического полимера, за исключением атомов углерода. Образовавшиеся УВ состоят из фрагментов полициклических ароматических молекул, имеющих плоскую шестиугольную сотовую структуру. При графитизации накапливаются ароматические фрагменты, повышаются модуль упругости и электропроводность волокон [13].

Углеволокнистый войлок производства ОАО «СветлогорскХимволокно»

Основными продуктами на основе углеродного волокна являются углеродный жгут, углеродные ленты и углеродная ткань. Углеродная ткань имеет высокую ориентацию волокон, что делает ее при взаимодействии с ЭМИ анизотропной и высокоотражающей. Наиболее перспективным продуктом для использования при создании широкополосного абсорбирующего экрана с минимальным отражением является углеволокнистый войлок, выпускаемый ОАО «СветлогорскХимволокно» (рис. 1).



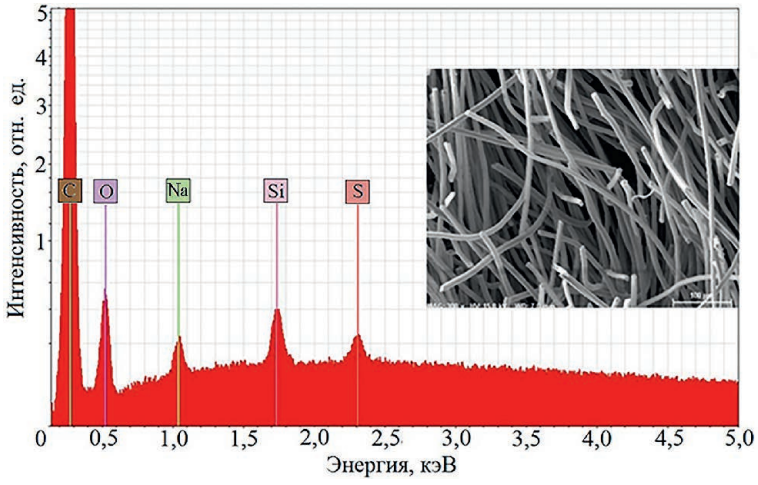
Рис. 1. Углеволокнистый войлок производства ОАО «СветлогорскХимволокно»
Fig. 1. Carbon felt produced by JSC “SvetlogorskKhimvolokno”

Углеволокнистый (карбонизированный и графитизированный) войлок изготавливают из рубленых УВ путем насыпа заранее подготовленных волокон ровным слоем на перфорированный стол и с последующим сшиванием методом иглопробивания. Учитывая тот факт, что полотно войлока является нетканым, не следует ожидать от него стабильной толщины по длине всего полотна – в основном толщина колеблется в пределах ±1 мм от номинально задекларированной.

Длина волокон, применяемых при производстве теплоизоляционных войлоков, может варьироваться от 0,5 до 50,0 мм в зависимости от типа и назначения войлока, а также от имеющихся в наличии типов волокна. Войлоки, изготовленные из коротких волокон, имеют худшие механические характеристики по сравнению с войлоками, изготовленными из длинных волокон. Однако они являются лучшими теплоизоляторами благодаря тому, что в них нет волокон, насквозь проходящих через толщину полотна и являющихся хорошими теплопроводниками.

В отечественной промышленности наиболее распространены две основные марки графтизированного войлока: НТМ-200 (Россия) и «Карбопон» (Беларусь). Среди углеволокнистых войлоков импортного производства наиболее известен GFA-10 (SGL Carbon, Германия). Элементный состав может вносить свой вклад в физико-химические свойства УВ, определяющие характер его взаимодействия с СВЧ-излучением.

При проведении исследований методом EDX изучали элементный состав углеволокнистого войлока производства ОАО «СветлогорскХимволокно» (рис. 2).



El	AN	Series	Unn. C [wt. %]	Norm. C [wt. %]	Atom. C [wt. %]	Error [wt. %]
C	6	K-series	86.71	86.71	90.30	9.5
O	8	K-series	11.16	11.16	8.72	1.6
Si	14	K-series	1.06	1.06	0.47	0.1
Na	11	K-series	0.60	0.60	0.32	0.1
S	16	K-series	0.47	0.47	0.18	0.0
		Total:	100.00	100.00	100.00	

Рис. 2. Элементный состав углеволокнистого войлока производства ОАО «СветлогорскХимволокно»
Fig. 2. Elemental composition of carbon felt produced by JSC “SvetlogorskKhimvolokno”

Основные элементы состава – углерод С (86 %) и кислород О (11 %). Наличие Si, Na и S в составе связано с загрязнением оснастки растрового электронно-лучевого микроскопа, на котором проводились измерения EDX. Большое количество кислорода может быть связано с окисленной поверхностью углеродного волокна, либо с остаточным кислородом, оставшимся после карбонизации целлюлозы. В рассматриваемом случае использовалось карбонизированное волокно, т. е. отожженное при относительно низких температурах (до 1000 °С). В отличие от графитизированного волокна, отжигаемого при температурах до 3000 °С, карбонизированное волокно обладает волновым сопротивлением, близким к атмосферному волновому сопротивлению, что необходимо для снижения отражения ЭМИ в СВЧ-диапазоне. Однако при этом могут присутствовать остатки некарбонизированной целлюлозы. Водород невозможно зарегистрировать методом EDX. Таким образом, в структуре волокна, наряду с кислородом, возможно присутствие и водорода в составе остатков не прошедших карбонизацию молекул целлюлозы. Элементный состав может вносить свой вклад в физико-химические свойства УВ, определяющие характер его взаимодействия с СВЧ-излучением. Оптимизация внутренней структуры УВ посредством изменения режимов термообработки исходного вискозного волокна открывает возможность получения желаемых характеристических параметров взаимодействия рабочего поглощающего материала с ЭМИ СВЧ-диапазона.

Микрофотографии внутренней структуры углеволокнистого войлока, полученные методом растровой электронной микроскопии, показаны на рис. 3.

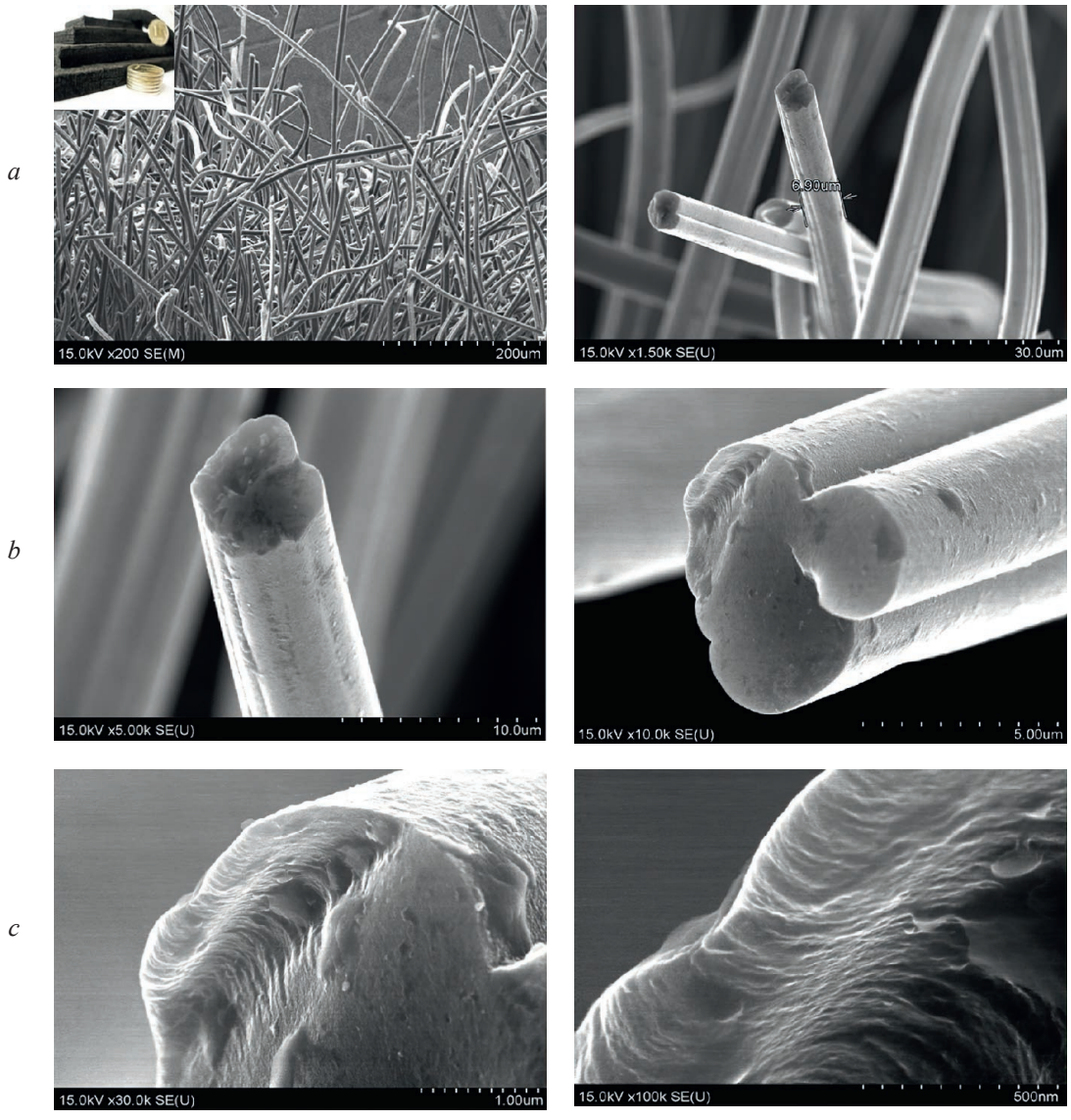


Рис. 3. Структура углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22»
Fig. 3. Structure of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”

Как видно из микрофотографий, средний диаметр УВ лежит в диапазоне 5–7 мкм, средняя дистанция между волокнами (разреженность) – 10–20 мкм. Внутренняя структура волокна при микронном разрешении – плотная, сплошная, без видимых дефектов, включений и полостей. На рис. 3, *c* наблюдается некоторая зернистость внутренней структуры, однако на рис. 3, *a*, *b* она отсутствует. На микрофотографиях виден составной характер структуры УВ, которое спечено из двух, трех волокон меньшего диаметра. Как известно, структура волокна формируется при экструзии размягченной массы через систему мелких фильер. Скорее всего, составная структура УВ была задана соответствующей формой фильеры при экструзии гидратцеллюлозы.

Разнесенные в объеме волокна, отожженные при определенной температуре для получения требуемой проводимости, позволяют получить материал с разным значением волнового сопротивления, в том числе и материал, волновое сопротивление которого согласуется с волновым сопротивлением среды распространения электромагнитных волн. Проводимость углеволокнистого войлока зависит от температуры повторного отжига: чем она выше, тем больше процентное отношение углерода в волокнах, отсюда – выше проводимость материала.

В процессе исследований разработан температурно-временной технологический профиль высокотемпературного отжига в инертной азотной среде серийно выпускаемого углеродного нетканого материала «Карбопон В-22-М» с поверхностным сопротивлением 0,5 Ом [3]. В табл. 1 приведены температура отжига четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» и их поверхностное сопротивление.

Таблица 1. Параметры образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22»
Table 1. Parameters of samples of carbon fiber felt "Carbopon-B-22"

Номер образца	Температура отжига, °С	Поверхностное сопротивление, Ом
1	720	100–150
2	710	150–200
3	700	500–580
4	600	1100–1200

Методика проведения эксперимента и его результаты

В процессе выполнения экспериментов был разработан стенд (рис. 4) для измерения поверхностного сопротивления четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» при различных режимах отжига. Образец войлока «Карбопон-В-22» закреплялся на накладные медные контакты, размещенные по его краям. Методика прведения измерений соответствовала требованиям ГОСТ Р 50499–93 (МЭК 93-80) «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения удельного объемного и поверхностного сопротивления» и ГОСТ 19616–74 «Ткани и трикотажные полотна. Метод определения удельного поверхностного электрического сопротивления».

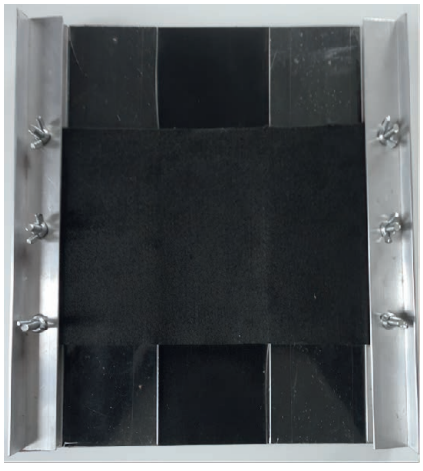


Рис. 4. Стенд для измерения поверхностного сопротивления углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» с закрепленным образцом
Fig. 4. Stand for measuring surface resistance of carbon fiber felt "Carbopon-B-22" with a fixed sample

На рис. 5 приведены результаты измерений поверхностного сопротивления четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» в течение семи лет хранения при комнатной температуре. Анализируя полученные данные, можно констатировать увеличение поверхностного сопротивления всех четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» примерно в 1,7–1,8 раза независимо от первоначального значения. Результаты исследований важны для прогнозирования долговременной стабильности характеристик такого войлока, который может использоваться в качестве высокоэффективных широкополосных экранов ЭМИ и радиопоглощающих покрытий. Для исключения окисления УВ от воздействия молекулярного кислорода необходима герметизация материала [14].

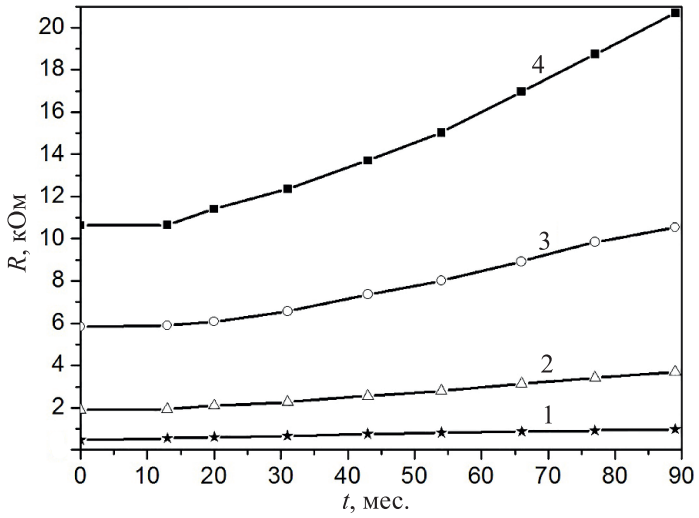


Рис. 5. Долговременное изменение поверхностного сопротивления образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22»
Fig. 5. Long-term change in surface resistance of samples of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”

Заключение

1. Окисление углеродных волокон приводит к ухудшению их свойств, в первую очередь физико-механических. В процессе окисления уменьшается средний размер кристаллитов за счет уменьшения размеров кристаллитов во внешнем слое волокна и увеличения расстояния между графитовыми плоскостями, что сопровождается повышением плотности волокна и потерей массы. Увеличение межплоскостных расстояний обусловлено реакцией кислорода с атомами углерода с образованием функциональных групп –COOH, C–O–C и C=O. Проведенные исследования показали увеличение поверхностного сопротивления материала «Карбопон-В-22» в 1,7–1,8 раза в течение определенного времени независимо от первоначального значения.

2. Окисление может ограничивать использование углеродных волокон и материалов на их основе. Учитывая перспективность практического применения углеволокнистых материалов, новые данные о долговременной стабильности и надежности их свойств могут способствовать новым исследованиям и разработкам модификации конструктива использования данных материалов.

Список литературы

1. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богуш [и др.]. Минск: Бестпринт, 2003.
2. Bogush, V. A. Application of Electroless Metal Deposition for Advanced Composite Shielding Materials / V. A. Bogush // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2005. Vol. 7, No 3. P. 1635–1643.
3. Широкополосный поглотитель электромагнитного излучения / В. А. Богуш [и др.] // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 10. С. 15–20.
4. Характеристики отражения градиентной углеродной структуры с магнитными наночастицами в сверхвысокочастотном диапазоне / А. В. Гусинский [и др.] // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. XII Междунар. симп., Минск, 21–23 сент. 2022 г. Минск: Издат. центр БГУ, 2022. С. 74–86.
5. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном / А. С. Агафонова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 56–59.
6. Chung, D. D. L. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials / D. D. L. Chung // Carbon. 2001. Vol. 39, Iss. 2. P. 279–285.
7. Emerson and Cuming_Microwave Products [Electronic Resource]. Mode of access: http://eltm.ru/editor/upload-files/Cuming_Microwave.pdf. Date of access: 18.09.2024.
8. Interaction of Electromagnetic Waves in a Waveguide with Very Thin Wires / He Shi [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. 2011. Vol. 56. P. 1193–1196.

9. Values of the Absorption Efficiency Factor of a Thin Metal Cylinder in the Microwave Band / V. M. Kuzmichev [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. 2003. Vol. 48, No 11. P. 1240–1242.
10. Method Fabrication of Electroconductive Fibers: Pat. US 3022026 / C. G. Cofer, D. E. Mccoy. Publ. 13.03.2019.
11. Сидорина, А. И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) / А. И. Сидорина // Авиационные материалы и технологии. 2021. Т. 64, № 3. С. 105–116.
12. Park, S.-J. Carbon Fibers / S.-J. Park. Singapore: Springer Verlag, 2019.
13. Мелешко, А. И. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты / А. И. Мелешко, С. П. Половников. М.: Сайнс-Пресс, 2007.
14. Широкополосный поглотитель электромагнитного излучения и способ его изготовления: пат. BY 23903 / В. А. Богуш, В. А. Лабунов, А. В. Гусинский, В. А. Карпович, В. Н. Родионова. Опубл. 30.12.2022.

Поступила 18.02.2025 Принята в печать 26.05.2025

References

1. Bogush V. A., Borbotko T. V., Gusinsky A. V., Lynkov L. M., Tamelo A. A. (2003) *Electromagnetic Radiation. Methods and Means of Protection*. Minsk, Bestprint (in Russian).
2. Bogush V. A. (2005) Application of Electroless Metal Deposition for Advanced Composite Shielding Materials. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 7 (3), 1635–1643.
3. Bogush V. A., Labunov V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Rodionova V. N., Pevneva N. A., et al. (2024) Broadband Absorber of Electromagnetic Radiation. *Radio Engineering and Electronics*. 69 (10), 15–20 (in Russian).
4. Gusinsky A. V., Pevneva N. A., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Rodionova V. N. (2022) Reflection Characteristics of a Gradient Carbon Structure with Magnetic Nanoparticles in the Microwave Range. *Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter: Collection of Scientific Papers from the XII International Symposium, Minsk, Sept. 21–23.* Minsk, BSU Publishing Center. 74–86 (in Russian).
5. Agafonova A. S., Belyaev A. A., Kondrashov E. K., Romanov A. M. (2013) Features of the Formation of Monolithic Structural Radio-Absorbing Materials Based on Composites Filled with Resistive Fiber. *Aviation Materials and Technologies*. (3), 56–59 (in Russian).
6. Chung D. D. L. (2001) Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials. *Carbon*. 39 (2), 279–285.
7. *Emerson and Cuming_Microwave Products*. Available: http://eltm.ru/editor/upload-files/Cuming_Microwave.pdf (Accessed 18 September 2024).
8. Shi He, Shulga S. N., Kokodity N. G., Gorobets N. N., Kiiko V. I., Butrym A. Yu., et al. (2011) Interaction of Electromagnetic Waves in a Waveguide with Very Thin Wires. *J. Commun. Technol. Electron*. 56, 1193–1196.
9. Kuzmichev V. M., Kokodii N. G., Safronov B. V., Balkashin V. P. (2003) Values of the Absorption Efficiency Factor of a Thin Metal Cylinder in the Microwave Band. *J. Commun. Technol. Electron*. 48 (11), 1240–1242.
10. Cofer C. G., Mccoy D. E. (2019) Method Fabrication of Electroconductive Fibers. *Pat. US 3022026*. Publ. 13.03.2019.
11. Sidorina A. I. (2021) Multiaxial Carbon Fabrics in Aviation Products (Review). *Aviation Materials and Technologies*. 3 (64), 105–116 (in Russian).
12. Park S.-J. (2019) *Carbon Fibers*. Singapore, Springer Verlag.
13. Meleshko A. I., Polovnikov S. P. (2007) *Carbon, Carbon Fibers, Carbon Composites*. Moscow, Science-Press Publ. (in Russian).
14. Bogush V. A., Labunov V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Rodionova V. N. (2022) Broadband Absorber of Electromagnetic Radiation and the Method of Its Manufacture. *Pat. BY 23903*. Publ. 30.12.2022 (in Russian).

Received: 18 February 2025 Accepted: 26 May 2025

Вклад авторов

Лабунов В. А. осуществил постановку задачи, отредактировал и окончательно утвердил рукопись для публикации, произвел ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания, проанализировал и интерпретировал данные.

Гусинский А. В. осуществил выработку технических требований к комплексу свойств для материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением, проанализировал и интерпретировал данные.

Певнева Н. А. представила замысел и дизайн исследования электродинамических параметров углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22», провела исследования, подготовила статью к публикации, обработала данные, оформила статью для публикации.

Остальные авторы внесли равнозначный вклад в подготовку статьи.

Authors' contribution

Labunov V. A. formulated the problem, edited and finally approved the manuscript for publication, critically revised it for significant intellectual content, analyzed and interpreted the data.

Gusinsky A. V. developed technical requirements for a set of properties for materials interacting with electromagnetic radiation, analyzed and interpreted the data.

Pevneva N. A. presented the concept and design of the study of electrodynamic parameters of conductive polymers, conducted the research, prepared the article for publication, processed the data, formatted the article for publication.

The remaining authors made an equal contribution to the preparation of the article.

Сведения об авторах

Лабунов В. А., д-р техн. наук, проф., зав. науч.-исслед. лаб. интегрированных микро- и наносистем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гусинский А. В., д-р техн. наук, доц., гл. науч. сотр. Научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9), БГУИР

Певнева Н. А., канд. техн. наук, доц., зав. поверочной лаб. Центра 1.9, БГУИР

Родионова В. Н., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Касперович М. М., науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Кашко И. А., науч. сотр. науч.-исслед. лаб. интегрированных микро- и наносистем, БГУИР

Танана О. В., канд. техн. наук, зам. декана гуманитарного факультета, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

Information about the authors

Labunov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Research Laboratory of Integrated Micro- and Nanosystems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gusinsky A. V., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Chief Researcher of the Scientific, Production, Educational Innovation Center of Microwave Technologies and Their Metrological Support (Center 1.9), BSUIR

Pevneva N. A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Verification Laboratory of the Center 1.9, BSUIR

Rodionova V. N., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher of Center 1.9, BSUIR

Kasperovich M. M., Researcher at the Center 1.9, BSUIR

Kashko I. A., Researcher at the R&D Laboratory of Integrated Micro- and Nanosystems, BSUIR

Tanana O. V., Cand. Sci. (Tech.), Deputy Dean of the Faculty of Humanities, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Певнева Наталья Алексеевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Pevneva Natalia Alekseevna