

УДК 544.032
DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.02

С.В. Бочкарев, В.В. Кудрявцев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Исследуются физико-механические свойства углеродного волокна VMN-4, облученного на ускорителе электронов ЭпТ-1,5А дозами до 10 МГр, которая выбиралась из ряда согласно ГОСТ 9.706-81. Показано, что углеродное волокно обладает высокой радиационной стойкостью до доз 7,0 МГр, а при дозах 1,0–3,0 МГр происходит увеличение прочности, которое обусловлено изменением плотности упаковки молекул за счет увеличения двойных и тройных связей в структуре волокна.

Приведены данные рентгенограмм, которые показали, что при облучении уменьшаются межплоскостные расстояния, т.е. происходит аморфизация материала за счет разрыва цепей и нарушения их упаковки. Рассчитан период кристаллической решетки d_{hkl} , который уменьшается с 3,56 (0 МГр) до 3,18 (9 МГр).

Приведены исследования структуры волокна методом электронного парамагнитного резонанса, который показал, что с повышением дозы облучения концентрация парамагнитных центров возрастает до 2 МГр, а затем резко падает. Показана корреляционная связь между ростом прочности и числом спинов в облученном волокне VMN-4.

Р. Паулик, И. Паулик, Л. Эрдеи исследовалась термостойкость системы на дериватографе с одновременным определением параметров при термографическом анализе.

По полученным термоаналитическим кривым были рассчитаны дифференциальные и на их основе интегральные теплоты сгорания, которые показали, что свыше 2 МГр наблюдается частичное радиационное повреждение волокна, приводящее к разрушению образовавшихся в материале двойных и тройных связей. Приведена зависимость максимальной скорости потери массы волокна от дозы облучения, которая резко уменьшается к дозе 2 МГр в 1,5 раза.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углеродное волокно, ускоренные электроны, космическое излучение, прочность, парамагнитный центр, свободные радикалы, рентгеноструктурный анализ, кристаллическая решетка, термографический анализ, дифференциальная теплота, интегральная теплота, корреляционная связь.

S.V. Bochkarev, V.V. Kudryavtsev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH ON RADIATION RESISTANCE OF CARBON FIBER

The physicomaterial properties of VMN-4 carbon fiber irradiated at the EIT-1.5A electron accelerator with doses of up to 10 MGy, which was selected from a series according to GOST 9.706-81, are being investigated. It has been shown that carbon fiber has high radiation resistance up to doses of 7.0 MGy, and at doses of 1.0–3.0 MGy there is an increase in strength, which is caused by a change in the packing density of molecules due to an increase in double and triple bonds in the fiber structure.

X-ray diffraction data are presented that show that irradiation reduces interplanar distances, that is, amorphization of the material occurs due to chain rupture and disruption of their packing. The crystal lattice period d_{hkl} is calculated, which decreases from 3.56 (0 MGy) to 3.18 (9 MGy).

The study of the structure of the fiber using the electron paramagnetic resonance method is presented, which showed that with increasing irradiation dose, the concentration of paramagnetic centers increases to 2 MGy, and then drops sharply. A correlation is shown between the increase in strength and the number of spins in the irradiated VMN-4 fiber.

Thermal resistance was studied on a derivatograph of the R. Paulik, I. Paulik, L. Erdei with the simultaneous determination of parameters during thermographic analysis.

Based on the obtained thermoanalytical curves, differential and, on their basis, integral heats of combustion were calculated, which showed that above 2 MGy, partial radiation damage to the fiber is observed, leading to the destruction of double and triple bonds formed in the material. The dependence of the maximum rate of fiber mass loss on the irradiation dose is given, which sharply decreases by a factor of 1.5 at a dose of 2 MGy.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber, accelerated electrons, cosmic radiation, strength, paramagnetic center, free radicals, X-ray diffraction analysis, crystal lattice, thermographic analysis, differential heat, integral heat, correlation connection.

Современные требования к конструкциям ракетно-космической техники ставят перед конструкторами и производителями новые задачи по эффективному использованию полимерных композиционных материалов (ПКМ), использование которых позволяет повысить коэффициент весового совершенства, что, несомненно, играет важную роль в ее развитии в рамках стратегического направления развития материалов и технологии [1].

В этой связи важную роль играет создание конструкций на основе новых перспективных ПКМ, которые позволят им работать в условиях космического пространства с учетом различных видов ионизирующего излучения.

Решение этой задачи может быть обеспечено за счет развития радиационного материаловедения, изучающего влияние облучения высокоэнергетическими частицами различной природы и энергии на функциональные свойства материалов. Среди факторов, которые оказывают негативное влияние на материалы, можно отметить атомарный кислород, солнечное УФ-излучения, ионизирующее излучение, протоны высокой энергии, выделяют электроны радиационных поясов Земли с энергией от 0,1 до 5 МэВ [2–4].

Потоки таких частиц принято называть космическим ионизирующим излучением, которое оказывает негативное воздействие на материалы и изготовленные из них элементы конструкций и оборудования космических аппаратов, приводящее к ухудшению их эксплуатационных характеристик и в конечном итоге – к сокращению сроков активного существования аппаратов [5].

Влияние факторов космического пространства на изменение свойств композиционных материалов необходимо исследовать как в связи с радиационной защитой, так и определением сроков их работоспособности. Появляющиеся в последнее время новые композиционные материалы требуют пересмотра существующих и разработки новых экспериментальных и расчетно-теоретических методов изучения радиационных воздействий, а также необходимо провести большой объем работ по исследованию радиационной стойкости материалов разных типов и изготовленных с их применением изделий.

Исследование свойств наполнителей композитных материалов обусловлено их ролью во влиянии на механические, термические и износостойкие характеристики [6].

Среди армирующих наполнителей большую роль играют углеродные материалы, широко распространенные в гибридных композитах для легких конструкционных композитов в аэрокосмической промышленности [7].

Немаловажную роль играет исследование армирующего материала, учитывая перспективу его использования для аддитивного производства [8, 9].

Среди первых работ по облучению углеродных волокон можно отметить работу [10], в которой исследовались свойства при облучении гамма-дозами в диапазоне 1–1000 Мрад и показано снижение прочности и модуля упругости, вероятно, из-за эффектов радиационного окисления. На влияние окислительных процессов при облучении углеродных и борных волокон указано в работе [11]. Изучение влияния электрофизического воздействия на углеродные материалы исследовалось также в работах [12–15] плазменной обработкой, [16–20] электромагнитным излучением, [21–24] ионным облучением, [25] гамма-излучением.

Для имитации воздействия космической радиации на материалы и элементы космических аппаратов используются различные ускорительные комплексы [26]. В работе был использован ускоритель электронов ЭлТ-1,5А с энергией электронов 1,5 МэВ, относящийся к типу источников ионизирующего излучения согласно ГОСТ 9.706-81. Облучение проводилось при энергиях 1,1 и 1,3 МэВ при токе пучка 5 и 7 мА, что обеспечивало мощность дозы 1,5 и 2,3 кГр/с соответственно. Облучение проводилось перемещением образцов на транспортере со скоростью 0,02 м/с под окном ускорителя.

Учитывая, что работающий на геостационарной орбите космический аппарат в течение 15 лет набирает дозу порядка 3 МГр [2], в экспериментах доза облучения не превышала 10 МГр и выбиралась из ряда согласно ГОСТ 9.706-81.

Облучение углеродного волокна ВМН-4 показывает, что оно обладает высокой радиационной стойкостью, повышает свою прочность после облучения ($\sigma_{вр}$) к исходной прочности ($\sigma_{в0}$), достигая максимума 1,38 при дозе 1,5 МГр (рис. 1).

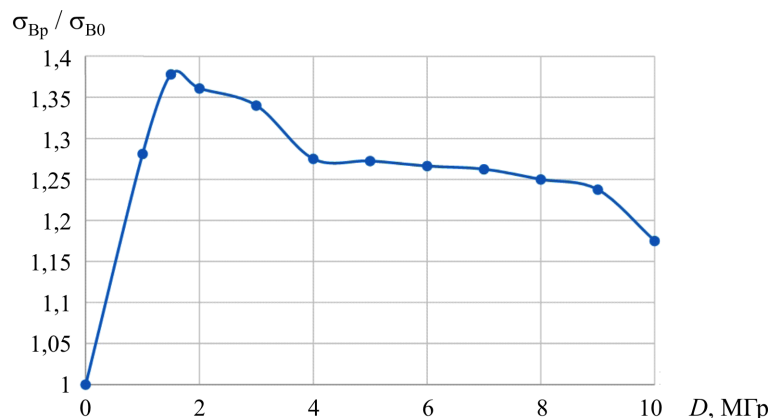


Рис. 1. Результаты испытаний углеродного волокна ВМН-4 при различных дозах облучения

При облучении на воздухе происходит окисление углеродного волокна, что приводит к уменьшению дефектности поверхности, увеличивает адгезионную прочность [27].

Известно, что практически любой технологический процесс, проводимый в воздушной среде на радиационно-химических установках с ускорителями электронов, сопровождается образованием озона. Как установлено в [28], выход озона не зависит от мощности поглощенной дозы в диапазоне 0,5–12 кГр/с (мы проводили эксперименты при 1,5 и 2,3 кГр/с) и равен 5,1 % в воздухе. При концентрации озона 2–6 % по объему и температуре обработки в пределах 0–80 °С наблюдается значительное увеличение интенсивности полос 1705 и 1785 см^{-1} , отвечающих валентным колебанием $\text{C} = \text{O}$ групп в продуктах окисления [29]. Рентгеновская электронная спектроскопия показала, что кислород на поверхности углеродного волокна присутствует в основном в виде карбонильных, эфирных и карбоксильных групп, содержание которых увеличивается в 2–4 раза и которые ответственны за адгезию. Такой рост приводит к тому, что адгезия при облучении возрастает на 40–60 % для углепластика на основе ЭД-20 [11].

Проведенные нами исследования показали, что в процессе облучения наблюдается сглаживание поверхностных дефектов (рис. 2), которое, однако, является не единственной причиной увеличения прочности.

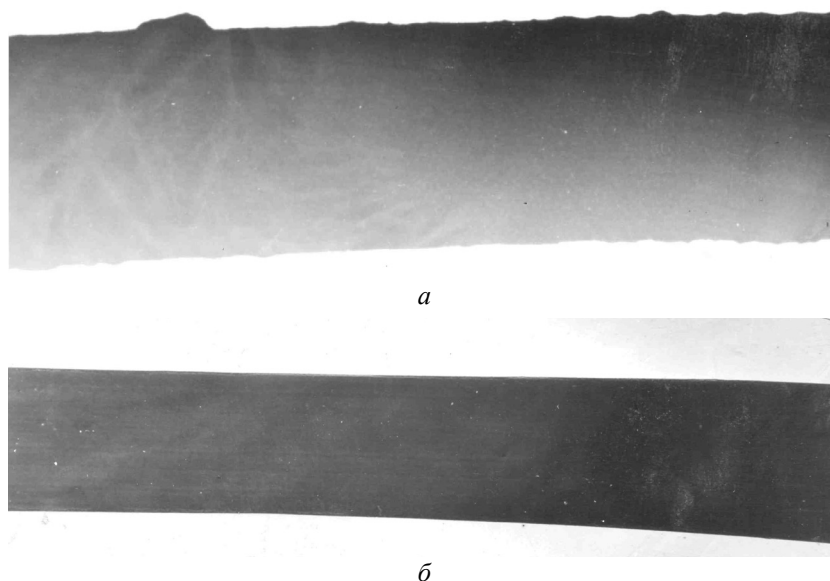


Рис. 2. Поверхность углеродного волокна ВМН-4: а – до облучения; б – после облучения ($\times 3000$)

В [30] отмечается, что при облучении углеродных волокон происходит расширение по оси C (между слоями) и сжатие по оси A (между атомами в слое), что вызывает уплотнение структуры, которое служит повышением прочности, а также снижает величину разброса механических характеристик [31]. Кроме того, вследствие разогрева при облучении может происходить снятие внутренних напряжений, удаление низколетучих фракций [32].

Повышение плотности может быть объяснено за счет увеличения двойных ($C=C$) и тройных ($C\equiv C$) связей в структуре волокна. Исходя из этого предположения энергия связи (ϵ) в углеродном волокне может быть записана следующим образом (при условии, что число тройных связей меньше, чем одинарных и двойных):

$$\epsilon = \frac{N - N_2}{N} \epsilon_{c-c} + \frac{N_2}{N} \epsilon_{c=c},$$

где N – общее число связей; N_2 – число двойных связей; ϵ_{c-c} – энергия связи $C-C$; $\epsilon_{c=c}$ – энергия связи $C=C$. Тогда рост прочности при облучении (коэффициента усиления K) может быть записан:

$$K = 1 - \alpha + \alpha \frac{\epsilon_{c=c}}{\epsilon_{c-c}} \epsilon_{c=c}, \quad (1)$$

где α – доля двойных связей.

Решая (1) при условии, что $K = 1,38$ (при дозе 1,5 МГр), $\epsilon_{c-c} = 348,18$, $\epsilon_{c=c} = 601,02$ кДж/моль [33] получим $\alpha = 52\%$. Учитывая, что при облучении происходит рост количества тройных связей $C\equiv C$, можно предположить, что для увеличения прочности на 1% необходимо увеличить в структуре волокна число двойных и тройных связей также на 1%.

Проведенный рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-2 (использовали трубку с медный анодом, $\lambda = 1,54$ А) показал (рис. 3), что с увеличением дозы облучения происходит смещение максимумов в сторону больших углов рассеивания, соответственно уменьшаются межплоскостные расстояния. Это, в свою очередь, указывает на увеличение плотности упаковки молекул в ВМН-4. При этом следует отметить уменьшение степени кристалличности, т.е. происходит аморфизация материала за счет разрыва цепей и нарушения их упаковки. Увеличение плотности упаковки связано с возрастанием прочности волокна, что и наблюдается в эксперименте.

По результатам рентгеновских исследований был рассчитан период кристаллической решетки d_{hkl} (таблица), который с ростом дозы уменьшается.

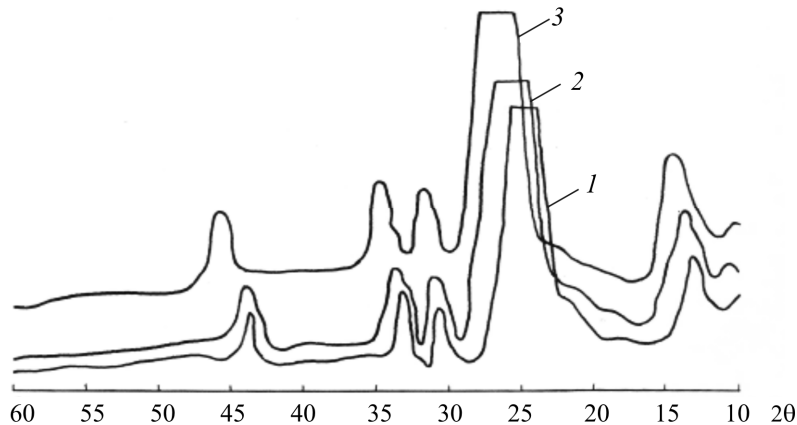


Рис. 3. Рентгенограммы ВМН-4 при различных дозах облучения:
1 – 0 МГр, 2 – 2 МГр, 3 – 5 МГр

Период кристаллической решетки облученного ВМН-4

Параметр	Доза облучения, МГр						
	0	1	2	3	5	7	9
d_{hkl}	3,56	3,54	3,50	3,47	3,42	3,24	3,18

Рентгеноструктурный анализ, проведенный через 10 лет после облучения при хранении в естественных условиях, показал, что характер главных линий остался без изменения, но смещен к первоначальному состоянию от состояния облучения на $2\Theta \approx 0,5^{\circ}$, т.е. наблюдается небольшая релаксация.

Проведенное нами исследование структуры углеродного волокна методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [34] на спектрометре FIZEPR-ESR12 показало, что с повышением дозы облучения концентрация свободных радикалов возрастает (рис. 4) до 2 МГр, а затем резко падает. Появление парамагнитных центров (ПМЦ) служит прямым доказательством образования неспаренных электронов – свободных радикалов, которые могут участвовать в реакциях рекомбинации с образованием все большего накопления связей $C=C$ и $C\equiv C$ вместо $C-C$, что приводит к уменьшению пористости материала и согласуется с данными, полученными в [30]. Подобные явления происходят при карбонизации при температуре выше $800-1000^{\circ}C$ [33]. Представленная на рис. 5 зависимость роста прочности ВМН-4 при облучении от числа ПМЦ показывает, что между ними существует корреляционная связь.

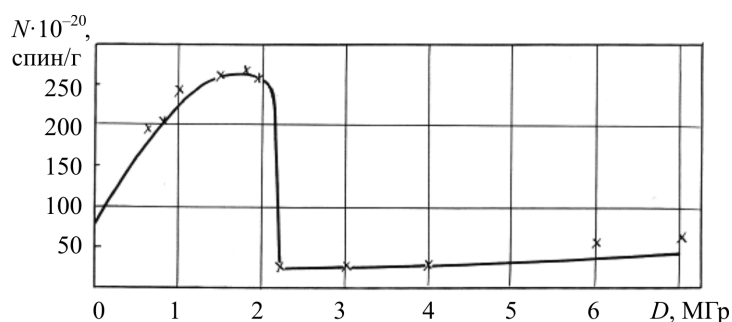


Рис. 4. Концентрация парамагнитных центров, образующихся в волокне ВМН-4, в зависимости от дозы облучения

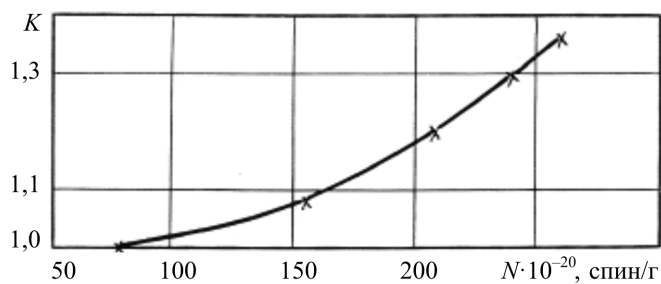


Рис. 5. Корреляционная связь между ростом прочности K и числом спинов в облученном волокне ВМН-4

Как известно, одной из важнейших характеристик для материалов, используемых при производстве конструкций, является термостойкость. Радиационно-химические процессы, происходящие в композиционных материалах, приводят к изменению ряда физико-механических характеристик, в частности к термостойкости. В этом случае важно знать не только температуру начала разложения материала, но и температурно-временную зависимость потери массы. Кроме того, для тепловых расчетов необходимо знать кинетические параметры термодеструкции, среди которых наиболее важными являются энергия активации E_a и порядок термодеструкции – величины строго экспериментальные. Эти данные, получаемые термографическим

методом, необходимы для использования в тепловых и конструкторских расчетах изделий ракетно-космической техники.

Метод термографического анализа [35–39] позволяет не только определять термостойкость исследуемых систем, но и точно охарактеризовать химические и физические процессы, происходящие в материале при его нагреве. В частности, можно сказать, при каких температурах начинаются отдельные процессы, где достигается их максимальная скорость и где она кончается. Кроме того, можно сказать, сопровождается ли данный термический процесс изменением массы и в случае изменения происходит ли увеличение или уменьшение его.

Термостойкость оценивалась по следующим параметрам: температуре начала разложения; температуре начала реакции термодеструкции, которая характеризуется значительным увеличением скорости убыли массы; энергии активации.

Термоаналитические кривые снимали на дериватографе системы Р. Паулик, И. Паулик, Л. Эрдеи системы МОМ (Венгрия), позволяющем одновременно определять ТГ, ДТГ, ДТА и изменение температуры T исследуемого образца. Для съемки термограмм использовали платиновые тарелки, которые с тщательно измельченным исследуемым образцом и эталоном (Al_2O_3 , прокаленная при $1200\text{ }^\circ\text{C}$) помещали на спай платино-родиевых термопар, накрывали их кварцевым стаканом и равномерно со скоростью $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ нагревали в электропечи до необходимой температуры по заданной программе. Термограммы снимались при чувствительности кривой $T - 900\text{ }^\circ\text{C}$, ТГ – $200\text{ }^\circ\text{C}$, ДТА – $1/3$ и $1/15$ от максимальной чувствительности. При указанных условиях ошибка отсчета по весовой шкале не превышала $0,5\text{ мГ}$, ошибка намерения массы $0,002\text{ }%$, температуры – $\pm 0,5\text{ }%$.

По результатам исследований были рассчитаны дифференциальные (рис. 6) и на их основе интегральные теплоты сгорания (рис. 7). Увеличение интегральной теплоты свыше 2 МГр свидетельствует о частичном радиационном повреждении материала, приводящем к разрушению образовавшихся в материале двойных и тройных связей. При дозах $5\text{--}10\text{ МГр}$ наблюдается стабильность в структуре материала.

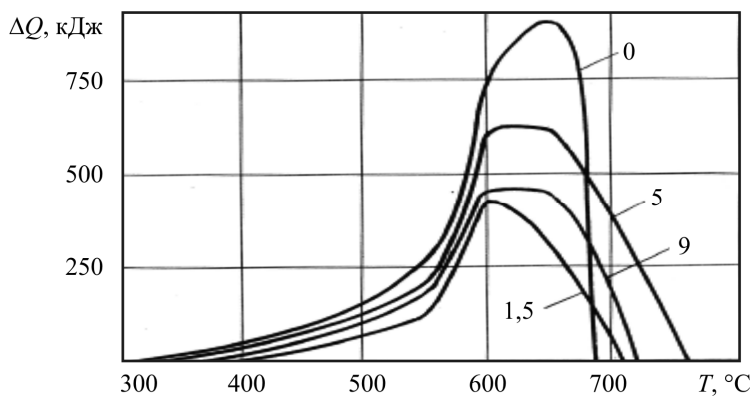


Рис. 6. Зависимость дифференциальной теплоты волокна ВМН-4 от температуры при различных дозах облучения (цифры у кривых – дозы облучения, МГр)

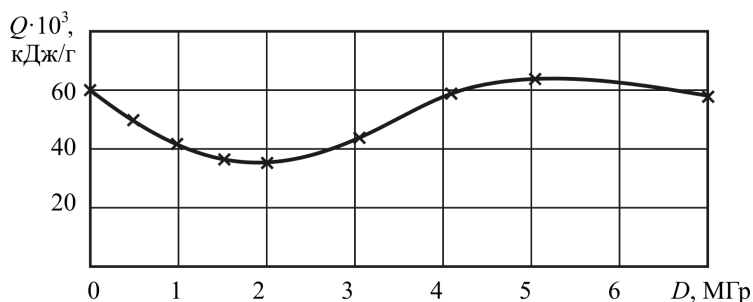


Рис. 7. Зависимость интегральной теплоты волокна ВМН-4 от дозы облучения

Проведенные расчеты по определению максимальной скорости потери массы образцов $d\alpha/d\tau$ (рис. 8) показали, что с ростом дозы облучения до 2 МГр она уменьшается и при дозе 1,5–2,0 МГр меньше примерно на 53 %, чем у необлученного волокна.

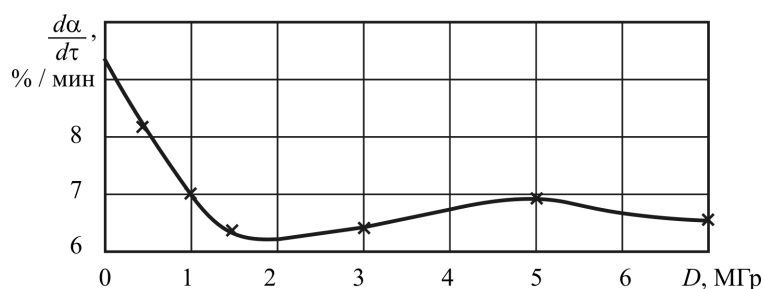


Рис. 8. Зависимость максимальной скорости потери массы волокна ВМН-4 от дозы облучения при температуре 600–650 °С

Заключение

В работе рассмотрены особенности поведения углеродного волокна ВМН-4 при действии электронного облучения. Приведены экспериментальные данные по рентгеноструктурному анализу, термоаналитическим кривым, электронному парамагнитному резонансу. Показано, что при радиационном воздействии в углеродном волокне наблюдается увеличение плотности упаковки молекул, которая приводит к увеличению прочности волокна. Появление парамагнитных центров служит прямым доказательством образования неспаренных электронов – свободных радикалов, которые могут участвовать в реакциях рекомбинации с образованием все большего накопления связей $C=C$ и $C\equiv C$ вместо $C-C$, что приводит к уменьшению пористости материала. Проведенные на основе термоаналитических кривых расчеты дифференциальных и интегральных теплоты сгорания показали, что при дозах свыше 2 МГр происходит увеличение интегральной теплоты, свидетельствующее о частичном радиационном повреждении материала, приводящем к разрушению образовавшихся в материале двойных и тройных связей. Проведенные исследования могут быть полезны при определении работоспособности композиционных материалов в условиях повышенной радиации и в космическом пространстве.

Библиографический список

1. Каблов, Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб.* (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. – С. 7–17.
2. Новиков, Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учеб. пособие / Л.С. Новиков. – М.: Университетская книга, 2010. – 192 с.
3. Никитенко, В.И. Радиационные условия и радиационная безопасность при полете космических аппаратов / В.И. Никитенко, В.И. Крайнюков. – М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2013. – 48 с.
4. Демина, Е.А. Обзор воздействия космической среды на космические аппараты / Е.А. Демина, Ж.М. Аукажиева // *Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам XLII Междунар. науч.-практ. конф.*, Москва, 17 ноября 2020 года. – Т. 11 (39). – М.: Интернаука, 2020. – С. 8–17.
5. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах / Е.Н. Каблов, О.В. Деев, И.С. Старцев, Е.Ф. Никишин // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2012. – № 10. – С. 2–9.
6. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review / R. Yadav, M. Singh, Shekhawat, D. Lee, S.-Y. Park, // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2023. – № 175 (4). – P. 107775. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107775
7. Pathak, A.K. Carbon Nanomaterial-Carbon Fiber Hybrid Composite for Lightweight Structural Composites in the Aerospace Industry: Synthesis, Processing, and Properties / A.K. Pathak, S.R. Dhakate // *Ad-*

vanced Composites in Aerospace Engineering Applications. – P. 445–470. – Springer Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-88192-4_23

8. Yan, J. Single-filament-wide tensile-testing specimens reveal material-independent fibre-induced anisotropy for fibre-reinforced material extrusion additive manufacturing / J. Yan, E. Demirci, A. Gleadall // *Rapid Prototyping Journal*. – May 2023. – 29 (PA). DOI: 10.1108/RPJ-09-2022-0301

9. Чабаненко, А.В. Качество текстуры поверхности и механические свойства материалов аддитивного производства с армированными углеродными волокнами производства FDM / А.В. Чабаненко // *Инновационное приборостроение*. – 2023. – Т. 2, № 6. – С. 11–16. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-6-11-16

10. Sharp, J.V. The effect of gamma irradiation on carbon fibre properties / J.V. Sharp, S.G. Burnay // *Radiat. Eff.* – 1974. – № 22 (1). – P. 45–48. DOI: 10.1080/00337577408232144

11. Effects of neutron irradiation on SiC fiber / K. Ocamura, T. Matsuzawa, M. Sato [et al.] // *J. of Nuclear Materials*. – Aug 1985. – Vol. 133–134. – P. 705–708.

12. Влияние обработки углеродного волокна низкотемпературной плазмой и электронным облучением на физико-механические свойства углепластиков / М.Ю. Дигилов, Г.В. Нейман, Х.М. Абирахимов, О.Т. Малючков // *Механика композитных материалов*. – 1989. – № 1. – С. 172–176.

13. Nelyub, V.A. The Effect of Plasma Radiation Treatment of Carbon Fibers on Their Physical and Mechanical Characteristics / V.A. Nelyub, T.D. Tarabrina // *Polymer Science, Series D*. – 2021. – Vol. 14, no. 3. – P. 450–455. DOI: 10.1134/S1995421221030230

14. Novel carbon fibers synthesis, plasma functionalization, and application to polymer composites / A. Khan, P. Jagdale, M. Rovere [et al.] // *Express Polymer Letters*. – 2021. – Vol. 15, No. 4. – P. 361–374. DOI: 10.3144/EXPRESSPOLYMLET.2021.31

15. Рентгенофотоэлектронное исследование поверхности углеродных волокон после обработки в низкотемпературной плазме октафторциклобутана / В.А. Шелестова, Е.М. Толстопятов, П.Н. Гракович [и др.] // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 323–328. DOI: 10.31857/S0044185622030196

16. Ansari, M.Sh. A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites / M.Sh. Ansari, S. Zafar, H. Pathak // *Results in Surfaces and Interfaces*. – 2023. – Vol. 12. – P. 100141. DOI: 10.1016/j.rsurfi.2023.100141

17. Взаимодействие электромагнитного излучения с наноккомпозитом на основе углеродных волокон / А.Л. Данилюк, В.А. Богущ, В.А. Лабунов, А.С. Басаев // *Наука – инновационному развитию общества: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16 ноября 2018 года / Национальная академия наук Беларуси*. – Минск: Беларуская навука, 2020. – С. 118–128.

18. Kang, S.H. Carbon fibers from high-density polyethylene using a hybrid cross-linking technique / S.H. Kang, K.W. Kim, B.J. Kim // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, no. 13. DOI: 10.3390/polym13132157

19. Dharmasiri, B. Carbon reinforced carbon fibers: Using surface modification as a route to enhanced physical performance / B. Dharmasiri, J. Randall, Y. Yin // *Composites Science and Technology*. – 2021. – № 218 (9). – P. 109217. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109217

20. Joule Heating of Carbon Fibers and Their Composites in Radio-Frequency Fields / S. Sh. Dasari, A. Sarmah, R.D. Mee [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – Vol. 25, no. 10. DOI: 10.1002/adem.202201631

21. Carbon reinforced carbon fibers: Using surface modification as a route to enhanced physical performance / B. Dharmasiri, J. Randall, Y. Yin [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2022. – Vol. 218. – P. 109217. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109217

22. Corrugation of Carbon Fibers upon High-Fluence Ion Irradiation: Prospects and Applications / N.N. Andrianova, A.M. Borisov, M.A. Ovchinnikov [et al.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2020. – Vol. 84, No. 6. – P. 707–712. DOI: 10.3103/S1062873820060039.

23. Модификация структуры поверхности углеродных волокон из ПАН высокодозным ионным облучением / Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, А.В. Макунин [и др.] // *Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2021: тр. XXV Междунар. конф., посв. 100-летию со дня рождения А.Д. Сахарова, Москва, 23–27 августа 2021 года*. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2021. – Т. 2. – С. 35–38.

24. Беграмбеков Л.Б. Воздействие ионного облучения на пиролитический графит и углеродные волокна / Л.Б. Беграмбеков, Н.А. Пунтаков, А.В. Грунин // *Взаимодействие плазмы с поверхностью: материалы XXVII Конф.: сб. науч. тр., Москва, 24–25 января 2024 года*. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2024. – С. 125–127.

25. Влияние гамма-излучения на прочность АБС-пластика, наполненного коротким углеродным волокном / Е.А. Лебедева, Д.К. Трухинов, Е.В. Корнилицина [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2022. – № 13. – С. 31–35. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-13-31-35
26. Акишин, А.И. Методы радиационных испытаний материалов космической техники / А.И. Акишин, Л.И. Иванов, Л.И. Цепляев // Перспективные материалы. – 2005. – № 4. – С. 20–30.
27. Нелюб, В.А. Влияние обработки углеродных волокон плазменным излучением на их физико-механические характеристики / В.А. Нелюб, Т.Д. Тарабрина // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2021. – Т. 3. – С. 26–33.
28. Рубин, Б.И. Образование и распад озона в РХА на ускорителях электронов / Б.И. Рубин, Г.З. Гочалиев // Тезисы докл. Шестого Всесоюз. Совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. – М.: ЦНИИаоминФорм, 1988. – С. 105–106.
29. Формирование адгезионно-активной поверхности углеродного волокна при окислительном воздействии / Л.Ф. Атякшева, Г.И. Емельянова, Т.С. Лазарева [и др.] // Механика композитных материалов. – 1983. – № 5. – С. 933–935.
30. Дубровский, В.Б. Радиационная стойкость материалов: справочник / В.Б. Дубровский. – М.: Атомиздат, 1973. – 264 с.
31. Wicks, V.J. Microstructural disorder and mechanical properties of carbon fibers / V.J. Wicks // J. of Nuclear materials. – 1975. – Vol. 56, № 3. – P. 287–296.
32. Исследование физико-механических свойств углеродных волокон при повышенных температурах / Г.Е. Мостовой, Н.Н. Дергунов, Ю.Н. Работнов, А.П. Ануфриев // Механика полимеров. – 1977. – № 4. – С. 626–630.
33. Конкин, А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы / А.А. Конкин. – М.: Химия, 1974. – 375 с.
34. Исследование методом ЭПР гамма-облученного поливиниливого спирта / С.Р. Аллаяров, А.В. Акимов, Д.А. Диксон, У.Ю. Аллаярова, Д.В. Мищенко, И.А. Фролов // Химия высоких энергий. – 2021. – Т. 55, № 2. – С. 49–53.
35. Сидорина, А.И. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению / А.И. Сидорина, А.М. Сафронов // Труды ВИАМ. – 2022. – № 7 (113). – С. 63–73. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73
36. A study on real-time quantitative thermal analysis of composite tapes / M. Lecorgne, E. Abisset-Chavanne, M.-M. Groz, A. Sommier, C. Pradère // NDT and EInternational. – 2024. – № 144. – Art. no. 103096. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103096
37. Bolshakov, V.A. The Use of Thermal Analysis for the Study of Carbon Fillers in Polymer-Composite Materials / V.A. Bolshakov, N.V. Antyufeeva, A.M. Safronov // Polymer Science – Series D. – 2023. – № 16 (2). – P. 494–497. DOI: 10.1134/S1995421223020065
38. Tomographic and Tension Analysis of Polypropylene Reinforced with Carbon Fiber Fabric by Injection Molding / M. Wieczorowski, A. Pereira, T. Prado, W. Grabon, M.C. Perez // Materials. – 2023. – № 16 (18). – Art. no. 6231. DOI: 10.3390/ma16186231
39. A Comprehensive Review on the Thermal Stability Assessment of Polymers and Composites for Aeronautics and Space Applications / G. Barra, L. Guadagno, M. Raimondo, E. Toto, S. Vecchio Cipriotti // Polymers. – 2023. – № 15 (18). – Art. no. 3786. DOI: 10.3390/polym15183786

References

1. Kablov E.N. Strategicheskiye napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030]. Sb.: Aviatsionnyye materialy i tekhnologii: Yubileynyy nauch.-tekhnich. sb. (prilozheniye k zhurnalu «Aviatsionnyye materialy i tekhnologii»). Moscow, VIAM, 2012, pp. 7-17.
2. Novikov L.S. Radiatsionnyye vozdeystviya na materialy kosmicheskikh apparatov [Radiation effects on spacecraft materials]. Moscow, Universitetskaya kniga, 2010, 192 p.
3. Nikitenko V.I., Krainyukov V.I. Radiatsionnyye usloviya i radiatsionnaya bezopasnost' pri polete kosmicheskikh apparatov [Radiation conditions and radiation safety during spacecraft flight]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana, 2013, 48 p. ISBN 978-5-7038-3743-6.
4. Demina E.A., Aukazhiyeva Zh. M. Obzor vozdeystviya kosmicheskoy sredy na kosmicheskiye apparaty [Overview of the impact of the space environment on spacecraft] // Tekhnicheskiye nauki: problem i

resheniya: sbornik statey po materialam XLII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moscow, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Internauka», 2020, vol. 11 (39), pp. 8-17.

5. Kablov E.N., Deyev O.V., Startsev I.S., Nikishin E.F. Svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov posle vozdeystviya otkrytogo kosmosa na okolozemnykh orbitakh [Properties of polymer composite materials after exposure to open space in near-earth orbits] // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2012, no. 10, pp. 2-9.

6. Yadav R., Singh M., Shekhawat D., Lee S.-Y., Park S.-J. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 175 (4): 107775, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107775

7. Pathak A.K., Dhakate S.R. Carbon Nanomaterial-Carbon Fiber Hybrid Composite for Lightweight Structural Composites in the Aerospace Industry: Synthesis, Processing, and Properties // Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications, pp. 445-470. Springer Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-88192-4_23

8. Yan J., Demirci E., Gleadall A. Single-filament-wide tensile-testing specimens reveal material-independent fibre-induced anisotropy for fibre-reinforced material extrusion additive manufacturing // Rapid Prototyping Journal 29 (PA), May, 2023. doi: 10.1108/RPJ-09-2022-0301

9. Chabanenko A.V. Kachestvo tekstury poverkhnosti i mekhanicheskiye svoystva materialov additivnogo proizvodstva s armirovannym i uglerodnymi voloknami proizvodstva FDM [Surface texture quality and mechanical properties of materials of additive manufacturing with carbon fiber reinforced FDM-production] // Innovatsionnoye priborostroyeniye. 2023, vol. 2, no. 6, pp. 11-16. doi 10.31799/2949-0693-2023-6-11-16.

10. Sharp J.V., Burnay S.G. The effect of gamma irradiation on carbon fibre properties // Radiat. Eff., 1974, no. 22 (1), pp. 45-48. doi.org/10.1080/00337577408232144

11. Okamura, K., Matsuzawa, T., Sato, M., Higashiguchi, Y., Morozumi, S. (1985). Effects of neutron irradiation on SiC fiber. Journal of Nuclear Materials, 133-134, pp. 705-708. doi: 10.1016/0022-3115(85)90240-5

12. Digilov M.Yu., Neyman G.V., Abirakhimov X.M., Malyuchkov O.T. Vliyaniye obrabotki uglerodnogo volokna nizkotemperaturnoy plazmoy i elektronnyim oblucheniyem na fiziko-mekhanicheskiye svoystva ugleplastikov [Effect of carbon fiber treatment by low-temperature plasma and electron irradiation on physical and mechanical properties of carbon plastics] // Mekhanika kompozitnykh materialov. 1989, no. 1, pp. 172-176.

13. Nelyub V.A., Tarabrina T.D. The Effect of Plasma Radiation Treatment of Carbon Fibers on Their Physical and Mechanical Characteristics // Polymer Science, Series D. 2021, vol. 14, no. 3, pp 450-455. doi: 10.1134/S1995421221030230.

14. Khan A., Dragatogiannis D., Jagdale P., Rovere M., Rosso C., Tagliaferro A., Charitidis C.A. Novel carbon fibers synthesis, plasma functionalization, and application to polymer composites // Express Polymer Letters. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 361-374. DOI 10.3144/EXPRESSPOLYMLET.2021.31.

15. Shelestova V.A., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Stratanovich V.A. Rentgenofotoelektronnoye issledovaniye poverkhnosti uglerodnykh volokon posle obrabotki v nizkotemperaturnoy plazme oktaftortsiklobutana [An X-ray photoelectron study of the surface of carbon fibers after treatment in a low-temperature octafluorocyclobutane plasma] // Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchitamaterialov. 2022, vol. 58, no 3. pp. 323-328. DOI 10.31857/S0044185622030196.

16. Ansari M. Sh., Zafar S., Pathak H. A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites // Results in Surfaces and Interfaces. 2023, vol. 12, p. 100141. doi: 10.1016/j.rsurfi.2023.100141.

17. Danilyuk A.L., Bogush V. A., Labunov V.A., Basayev A.S. Vzaimodeystviye elektromagnitnogo izlucheniya s nanokompozitom na osnove uglerodnykh volokon [Interaction of electromagnetic radiation with carbon fiber nanocomposite] // Nauka – innovatsionnomu razvitiyu obshchestva: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 16 noyabrya 2018 goda / Natsional'naya akademiya nauk Belarusi. Minsk, Belaruskaya navuka. 2020, pp. 118-128.

18. Kang S.H., Kim K.W., Kim B.J. Carbon fibers from high-density polyethylene using a hybrid cross-linking technique // Polymers. 2021, vol. 13, no. 13. DOI 10.3390/polym13132157.

19. Dharmasiri B., Randall J., Yin Y., Andersson G., Doeven E., Francis P., Henderson L. Carbon reinforced carbon fibers: Using surface modification as a route to enhanced physical performance // Composites Science and Technology. 2021, 218 (9): 109217. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109217

20. Dasari S., Sarmah A., Mee R., Khalfauai A., Green M. Joule Heating of Carbon Fibers and Their Composites in Radio-Frequency Fields // Advanced Engineering Materials. 2023, vol. 25, no. 10. DOI 10.1002/adem.202201631.

21. Carbon reinforced carbon fibers: Using surface modification as a route to enhanced physical performance / B. Dharmasiri, Ja. Randall, Ya. Yin [et al.] // Composites Science and Technology. – 2022. – Vol. 218. – P. 109217. – doi: 10.1016/j.compscitech.2021.109217. – EDN WCLYAE.

22. Andrianova N.N., Borisov A.M., Ovchinnikov M.A., Kazakov V.A., Makunin A.V., Mashkova E.S. Corrugation of Carbon Fibers upon High-Fluence Ion Irradiation: Prospects and Applications // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020, vol. 84, no. 6, pp. 707-712. doi: 10.3103/S1062873820060039.
23. Andrianova N.N., Borisov A.M., Makunin A.V., Mashkova E.S., Ovchinnikov M.A., Vysotina E.A. Modifikatsiya struktury poverkhnosti uglerodnykh volokon iz PAN vysokodozным ionnym oblucheniyem [Surface structure modification of PAN based carbon fibers by high fluence ion irradiation] // Vzaimodeystviye ionov s poverkhnost'yu VIP-2021: Trudy XXV Mezhdunarodnoy konferentsii. Posvyashchayetsya 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.D. Sakharova, Moskva, 23–27 avgusta 2021 goda. Moscow, Natsional'nyy issledovatel'skiy yaderny yuniversitet «MIFI», 2021, vol. 2, pp. 35-38.
24. Begrambekov L.B., Puntakov N.A., Grunin A.V. Vozdeystviye ionnogo oblucheniye na piroliticheskiy grafit i uglerodnyye volokna [Effects of ion irradiation on pyrolytic graphite and carbon fibers] // Vzaimodeystviye plazmy s poverkhnost'yu: Materialy XXVII konferentsii: Sbornik nauchnykh trudov, Moskva, 24–25 yanvarya 2024 goda. Moscow, Natsional'ny yissledovatel'skiy adernyy universitet MIFI, 2024, pp. 125–127.
25. Lebedeva E.A., Trukhinov D.K., Kornilitsina E.V., Astafeva S.A., Nurullaev E.M., Oniskiv V.D., Ibragimova E. Vliyaniye gamma-izlucheniya na prochnost' ABS-plastika, napolnennogo korotkim uglerodnym voloknom [Effect of gamma radiation on strength of ABS-plastic filled with short carbon fiber] // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2022, no. 13, pp. 31-35. doi: 10.31044/1994-6260-2022-0-13-31-35.
26. Akishin A.I., Ivanov L.I., Tsepilyayev L.I. Metody radiatsionnykh ispytaniy materialov kosmicheskoy tekhniki [Radiation tests of materials for space engineering] // Perspektivnyyematerialy. 2005, no. 4, pp. 20-30.
27. Nelyub V.A., Tarabrina T.D. Vliyaniye obrabotki uglerodnykh volokon plazmennym izlucheniyem na ikh fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki [Influence of carbon fibers treatment by plasma radiation on their physical and mechanical characteristics] // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2021, no. 3, pp. 26-33.
28. Rubin B.I., Gochaliyev G.Z. Obrazovaniye i raspad ozona v RKHA na uskoritelyakh elektronov [Ozone-formation and decay in RCA atelectrongaspedals] // Tezisy dokl. Shestogo Vses. Soveshchaniya po primeneniyu uskoriteley zaryazhennykh chastits v narodnom khozyaystve. Moscow, TSNIIamominForm, 1988, pp. 105-106.
29. Atyaksheva L.F., Yemel'yanova G.I., Lazareva T. S, Tarasevich B.N. Formirovaniye adgezionno-aktivnoy poverkhnosti uglerodnogo volokna pri okislitel'nom vozdeystvii [Formation of adhesion-active surface of carbon fiber under oxidative action] // Mekhanika kompozit. materialov. 1983, no. 5, pp. 933-935.
30. Dubrovskiy V.B. Radiatsionnaya stoykost' materialov [Radiation resistance of materials] /. Spravochnik. Moscow, Atomizdat, 1973, 264 p.
31. Wicks B.J. Microstructural disorder and mechanical properties of carbon fibers // J. of Nuclear materials. 1975, vol. 56, no. 3, pp. 287-296.
32. Mostovoy G.E., Dergunov N.N., Rabotnov Yu.H., Anufriyev A.P. Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv uglerodnykh volokon pri povyshennykh temperaturakh [Study of physical and mechanical properties of carbon fibers at elevated temperatures] // Mekhanika polimerov. 1977, no. 4, pp. 626-630.
33. Konkin A.A. Uglerodnyye i drugiye zharostoykiye voloknistyye materialy [Carbon and other heat-resistant fiber materials] / Moscow, Khimiya, 1974, 375 p.
34. Allayarov S.R., Akimov A.V., Dikson D.A., Allayarova U. Yu., Mishenko D.V., Frolov I.A. Issledovaniye metodom EPR gamma-obluchennogo polivinilivogospirta [An EPR study of gamma-irradiated polyvinyl alcohol] // Khimiya vysokikh energiy. 2021, vol. 55, no 2, pp. 49-53.
35. Sidorina A.I., Safronov A. M. Issledovaniye ustoychivosti uglerodnykh volokon k okisleniyu [Study of the resistance of carbon fibers to oxidation] // Trudy VIAM. 2022, no 7 (113), pp. 63-73. doi: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
36. Lecorgne M., Abisset-Chavanne E., Groz M.-M., Sommier A., Pradère C. A study on real-time quantitative thermal analysis of composite tapes // NDT and EInternational. 2024, 144, art. no. 103096. doi:10.1016/j.ndteint.2024.103096.
37. Bolshakov V. A, Antyufeeva N.V., Safronov A.M. The Use of Thermal Analysis for the Study of Carbon Fillers in Polymer-Composite Materials // Polymer Science - Series D, 2023, 16 (2), pp. 494-497. doi: 10.1134/S1995421223020065.
38. Wiczorowski M., Pereira A., Prado T., Grabon W., Perez M.C. Tomographic and Tension Analysis of Polypropylene Reinforced with Carbon Fiber Fabric by Injection Molding // Materials. 2023, 16 (18), art. no. 6231. doi: 10.3390/ma16186231.
39. Barra G., Guadagno L., Raimondo M., Toto E., Vecchio Cipriotti S.A Comprehensive Review on the Thermal Stability Assessment of Polymers and Composites for Aeronautics and Space Applications // Polymers. 2023, 15 (18), art. no. 3786. doi: 10.3390/polym15183786

Об авторах

Бочкарев Сергей Васильевич (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

Кудрявцев Владимир Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladim77@yandex.ru).

About the authors

Sergey V. Bochkarev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Microprocessor Automation Tools, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

Vladimir V. Kudryavtsev (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Rocket and Space Engineering and Energy Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: vladim77@yandex.ru).

Финансирование. Исследования выполнялись в рамках гранта РФФИ 18-29-18081.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 25.04.2024

Одобрена: 10.05.2024

Принята к публикации: 18.06.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Бочкарев, С.В. Исследование радиационной стойкости углеродного волокна / С.В. Бочкарев, В.В. Кудрявцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2024. – № 77. – С. 15–26. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.02

Please cite this article in English as: Bochkarev S.V., Kudryavtsev V.V. Research on radiation resistance of carbon fiber. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2024, no. 77, pp. 15-26. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.02