

УДК 544.032
EDN OYTXEX (<https://elibrary.ru/oytxex>)
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.04.04



ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Бочкарев С.В., Кудрявцев В.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Исследуются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксидных связующих ЭД-20, ЭДТ-10П, УП 2127А, ЭЦТ-1 термического отверждения с целью определения их радиационной стойкости и для изучения возможности использования облучения с целью регулирования физико-механических свойств. Облучение проводилось на ускорителе электронов ЭлТ-1,5А с энергией электронов 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. Исследуются физико-механические свойства ПКМ термического отверждения после облучения дозами до 10 МГр. Термостойкость оценивалась с помощью термографического анализа по температуре начала разложения; температуре начала реакции термодеструкции, энергии активации.

Облучение показало, что появляются два экзотермических пика. Первый экзотермический пик характеризует интенсивное взаимодействие эпоксидных групп с аминами, второй – свидетельствует о протекании реакции между эпоксидными и образующимися вторичными гидроксильными группами. Это обуславливает образование дополнительных химических связей в полимере и, как следствие, повышение механической прочности.

Степень завершенности процессов, происходящих под действием ионизирующего излучения, оценивали по интегральной теплоте термического разложения. Показано, что при малых дозах облучения до 1 МГр происходит ее уменьшение, что указывает на рост числа двойных связей, т.е. на дополнительное отверждение под действием облучения.

Испытания кольцевых образцов ПКМ с использованием армирующих материалов ВМН-4, ВМС-8, РВМН, СВМ показало, что в диапазоне доз 1-2 МГр наблюдается дополнительное структурирование (образуются дополнительные поперечные связи за счет возникновения реакционноспособных групп), максимальное значение которого сдвинуто в сторону меньших доз облучения. В результате увеличивается плотность пространственной сетки, снижается уровень внутренних напряжений, увеличивается структурная однородность связующего, что ведет к повышению термостойкости материала.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал; ускоренные электроны; космическое излучение; полимеризация; эпоксидные связующие; термографический анализ; интегральная теплота

INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Bochkarev S.V., Kudryavtsev V.V.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

ABSTRACT

Polymer composite materials (PCMs) based on thermally cured epoxy binders ED-20, EDT-10P, UP 2127A, ECT-1 are being studied in order to determine their radiation resistance and to study the possibility of using irradiation to regulate physical and mechanical properties. Irradiation was carried out on an ELT-1.5A electron accelerator with electron energies of 1.1 and 1.3 MeV at a beam current of 5 and 7 mA, which provided a dose rate of 1.5 and 2.3 kGy/s, respectively. Irradiation was carried out by moving samples on a conveyor at a speed of 0.02 m/s under the accelerator window. The physical and mechanical properties of thermally cured PCM after irradiation with doses of up to 10 MGy are studied. Thermal stability was assessed using thermographic analysis based on the temperature at which decomposition began; temperature of the beginning of the thermal destruction reaction, activation energy.

Irradiation showed that two exothermic peaks appeared. The first exothermic peak characterizes the intense interaction of epoxy groups with amines, the second indicates the occurrence of a reaction between the epoxy and the resulting secondary hydroxyl groups. This causes the formation of additional chemical bonds in the polymer and, as a result, an increase in mechanical strength.

The degree of completion of processes occurring under the influence of ionizing radiation was assessed by the integral heat of thermal decomposition. It has been shown that at low doses of irradiation up to 1 MGy, it decreases, which indicates an increase in the number of double bonds, i.e. for additional curing under irradiation.

Testing of ring-shaped PCM samples using reinforcing materials VMN-4, VMS-8, RVMN, SVM showed that in the dose range of 1-2 MGy additional structuring is observed (additional cross-links are formed due to the appearance of reactive groups), the maximum value of which is shifted towards smaller radiation doses. As a result, the density of the spatial network increases, the level of internal stresses decreases, and the structural homogeneity of the binder increases, which leads to an increase in the thermal resistance of the material.

Keywords: polymer composite material; accelerated electrons; cosmic radiation; polymerization; epoxy binders; thermographic analysis; integral heat

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях ракетно-космической техники играет важную роль в рамках стратегического направления развития материалов и технологии [1].

Их широкое применение в конструкциях, предназначенных для работы в условиях космического пространства, требует проведения исследований, учитывающих влияние таких факторов как атомарный кислород, солнечное УФ-излучение, ионизирующее излучение, протоны высокой энергии, электроны радиационных поясов Земли с энергией от 0,1 до 5 МэВ [2-5].

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 [6,7].

Влияние факторов космического пространства на изменение свойств ПКМ необходимо исследовать в связи, как радиационной защиты [8], так и определения 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 провести большой объем работ по исследованию радиационной стойкости материалов разных типов и изготовленных с их применением изделий. Под влиянием ионизирующих излучений в полимерах наступают сложные структурные изменения, связанные с образованием свободных радикалов, которые вызывают полимеризацию и могут довести олигомер до трехмерной пространственной системы. В частности, под влиянием ультрафиолетового излучения, СВЧ воздействия происходит изменение физико-механических свойств [9-11].

В полимере могут происходить процессы сшивания и деструкции, и в зависимости от того, какой процесс преобладает, ионизирующее излучение вызывает или улучшение многочисленных свойств (модуля упругости, разрывного напряжения, термической и химической стойкости и др.) или их ухудшение [12].

Способность полимеров к сшиванию или деструкции отчасти может быть связана с теплотой полимеризации. Полимеры с низкой теплотой полимеризации (38-68 кДж/моль) при облучении деструктируют, а с высокой (71-92 кДж/моль) сшиваются. Несмотря на то, что теплота полимеризации эпоксидных смол составляет 105 кДж/моль [13], однозначно дать ответ на то, что при облучении происходят процессы структурирования, приводящие к положительному эффекту, не представляется возможным.

Как показывают экспериментальные данные [14-17] радиационно-химические эффекты в полимерах не зависят от природы применяемого излучения, а определяются в основном химическим строением полимера и количеством поглощенной энергии. Однако в некоторых случаях выбор источника излучения может определять качество радиационно-химического процесса, особенно при большом времени облучения. Об этом свидетельствуют данные, полученные в [16], где показано, что облучение γ -лучами и нейтронами приводит к уменьшению прочности на изгиб, а облучение электронами к ее увеличению.

Первые данные по радиационному отверждению армирующих пластиков получены в конце 50-х годов [18]. В 1966 г. в работе [19] показано, что при облучении эпоксидных полимеров при дозе 82 кГр и мощности 0,23 кГр/с происходит падение прочности на 40%. При увеличении мощности дозы до 0,55 кГр/с такое падение наблюдается при дозе 400 кГр [20]. В [21,22] показано, что при облучении эпоксидного полимера на основе эпихлоргидрина и дефинилолпропана при дозах 0,2-15 МГр и мощности 0,84-2,1 кГр/с происходит раскрытие эпоксидных групп, сшивание и деструкция, сопровождающаяся выделением H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 . Облучение меньшими дозами 0,3 МГр практически не изменяет ударной и изгибной прочности [23]. Испытания прочности на разрыв, твердости и деформации также не дали больших отклонений от исходного состояния.

Увеличение прочности и модуля упругости соответственно на 20 и 15% при дозе 2-4 МГр за счет достижения максимального числа сшивок показано в [24-26]. Изменения, происходящие в полимерных материалах независимо от химического состава, зависят от поглощенной энергии [27], а не от вида излучения.

Наряду с упрочнением эпоксидной композиции [28] при облучении за счет дополнительной сшивки происходит повышение адгезионной связи [29], и теплофизических характеристик. Облучение композитных материалов сопровождается повышением механических характеристик [30-32] за счет пост-полимеризации эпоксидного связующего [33,34]. Кроме того, облучение углепластика приводит к появлению более однородной структуры, образуются дополнительные поперечные связи, увеличивается плотность пространственной сетки, снижается уровень внутренних напряжений, повышается теплостойкость и термостойкость [35], а также стойкость к распространению трещин [36], то есть ионизирующее излучение является одним из методов управления полнотой сшивки [37]. В основном процессы сшивки в зависимости от температуры разогрева матрицы [38] завершаются к дозе 1,5-2,0 МГр, а свыше появляется вероятность деструктивных изменений [39,40].

Облучение ускоренными электронами, γ -излучением и нейтронами стекло- и углепластиков позволяет выдерживать дозы от 5 до 150 МГр [41-45]. Радиационная стойкость эпоксидных композитов определяется видом отвердителя, и снижение прочности для ароматических значительно слабее, чем для алифатических [46]. Для радиационного сопротивления важна также и адгезия матрица-волокно [47,48], так как облучение приводит к нарушению межфазного взаимодействия, что приводит к уменьшению способности передавать нагрузку от матрицы к волокну. Разрушение адгезии происходит при дозе 50 МГр [49].

Существующие исследования указывают на сложность и неоднозначность процессов, происходящих в материалах при действии ионизирующих излучений [50]. Показано, что на околоземных орбитах главными, доминирующими процессами в ПКМ являются микроэрозионное повреждение поверхности и доотверждение связующего.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе исследовались ПКМ на основе эпоксидных связующих термического отверждения (в дальнейшем называем эпоксидные полимеры) как с целью определения их радиационной стойкости, так и для изучения возможности использования облучения с целью регулирования физико-механических свойств ПКМ. 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.

Известно, что они во многом определяются свойствами полимерной матрицы. Для изучения изменения свойств эпоксидных полимеров при облучении использовался метод термографического анализа [51].

Метод термографического анализа позволяет не только определять термостойкость исследуемых систем, но и позволяет 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 $1200^\circ C$) помещали на спаи платино-родиевых термодпар, накрывали их кварцевым стаканом и равномерно, со скоростью $10^\circ C/мин$, нагревали в электропечи до необходимой температуры по заданной программе. Термограммы снимались при чувствительности кривой $T-900^\circ C$, ТГ- $200^\circ C$, ДТА- $1/3$ и $1/15$ от максимальной чувствительности. При указанных условиях ошибка отсчета по весовой шкале не превышала $0,5 мГ$, ошибка намерения массы – $0,002\%$, температуры – $\pm 0,5\%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнивая характеристики поведения эпоксидных полимеров (рис.1-4) при действии облучения, следует отметить устойчивость свойств на основе связующего ЭДТ-10П и улучшение их у ЭД-20.

Как видно из термограмм ЭД-20, при облучении появляются два экзотермических пика. Следуя [52], первый экзотермический пик характеризует интенсивное взаимодействие эпоксидных групп с аминами, второй – свидетельствует о протекании реакции между эпоксидными и образующимися вторичными гидроксильными группами. Это обуславливает образование дополнительных химических связей в полимере и, как следствие, повышение механической прочности. В целом реакция способствует наиболее полному завершению процессов полимеризации и, за исключением УП2127А, почти не влияет на структурные изменения.

Чтобы более полно судить о степени завершенности процессов, происходящих под действием ионизирующего излучения, определяли интегральную теплоту термического разложения. Учитывая, что тепловыделение для каждого темпа нагрева с точностью до теплоемкости материала и продуктов деструкции можно определить, как [53]

$$\Delta Q \cong E_a dTG/dt,$$

где ΔQ – дифференциальная теплота термического разложения; dTG/dt – скорость потери массы образца. Она может быть найдена как тангенс угла наклона кривой потери массы образца (рис.5).

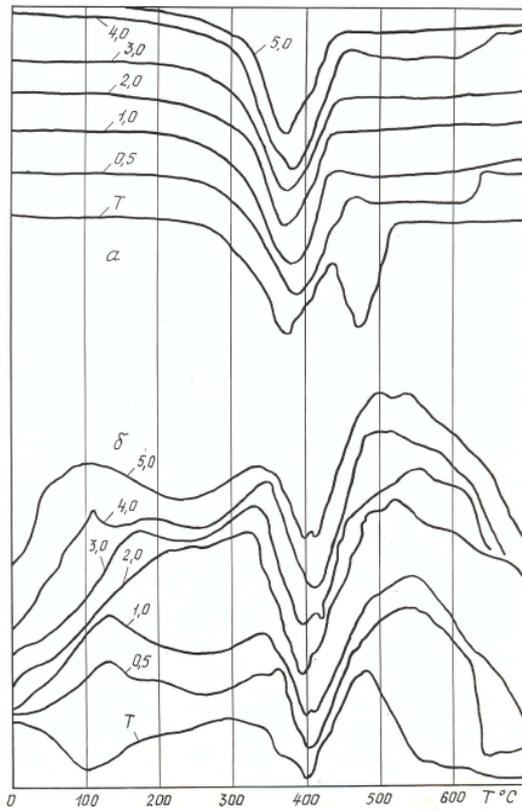


Рис.1. Термограммы ДТГ (а) и ДТА (б) эпоксидного полимера ЭД-20. Цифры у кривых – дозы облучения в МГр.

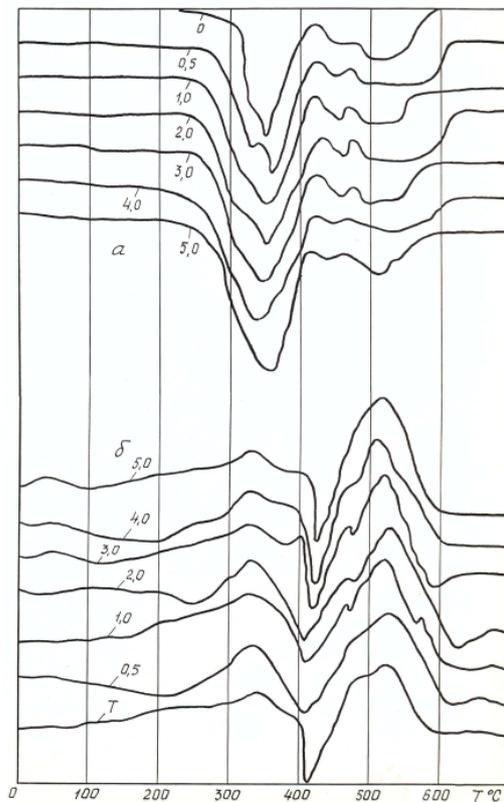


Рис.2. Термограммы ДТГ (а) и ДТА (б) эпоксидного полимера ЭДТ-10П. Цифры у кривых – дозы облучения в МГр.

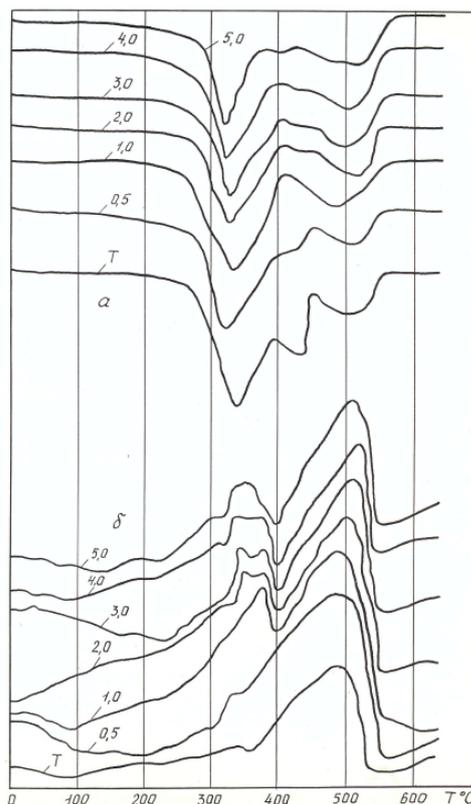


Рис.3. Термограммы ДТГ (а) и ДТА (б) эпоксидного полимера УП 2127А. Цифры у кривых – дозы облучения в МГр.

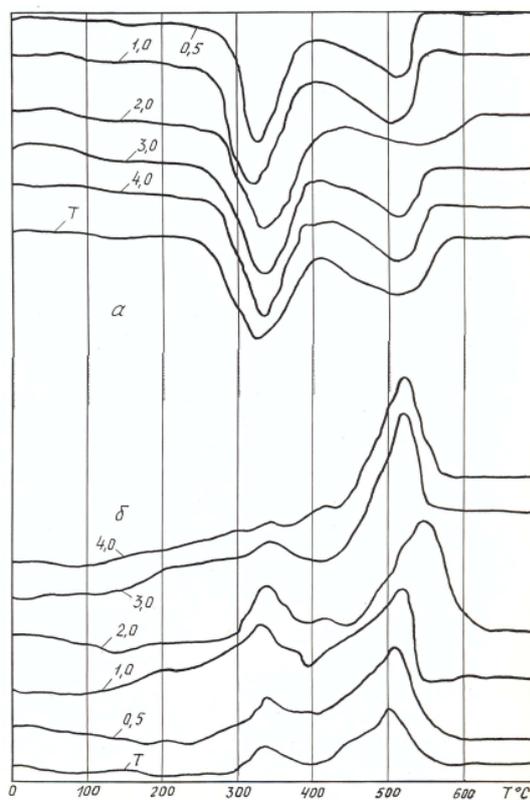


Рис.4. Термограммы ДТГ (а) и ДТА (б) эпоксидного полимера ЭЦТ-1. Цифры у кривых – дозы облучения в МГр.

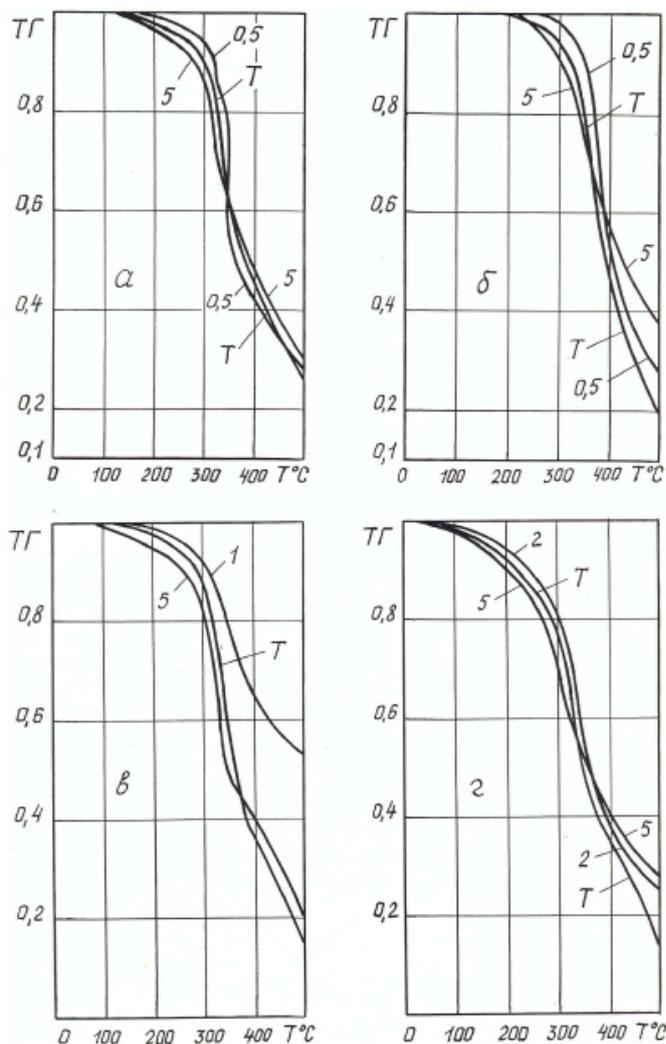


Рис.5. Температурная зависимость потери массы эпоксидных полимеров: а) ЭДТ-10П, б) ЭД-20, в) УП2127А, г) ЭЦТ-1. Цифры у кривых – дозы облучения в МГр, Т – термическое отверждение.

Интегральная теплота определялась как интеграл площади дифференциальной кривой. Интегральная теплота позволяет судить о частоте сшивки в полимере: уменьшение ее свидетельствует о большей степени завершенности процесса отверждения.

Возрастание максимальной скорости термического разложения, определенное как тангенс угла наклона кривой потери массы (рис.5), $d\bar{G}/dt$ (\bar{G} относительное изменение массы облученного образца по отношению к термически отвержденному) при высоких дозах облучения связано (рис.6), по-видимому, с радиационным разрушением, о чем свидетельствует и рост интегральной теплоты термического разложения (рис.7). При малых дозах облучения (до 1 МГр) уменьшение интегральной теплоты термического разложения указывает на рост числа двойных связей, т.е. на дополнительное отверждение под действием облучения.

Поведение относительной энергии активации $\bar{E} = E_{TP}/E_T$ (E_{TP} – энергия активации облученного образца) указывает (рис.8) на возникновение стерических затруднений при термическом разложении с ростом дозы облучения.

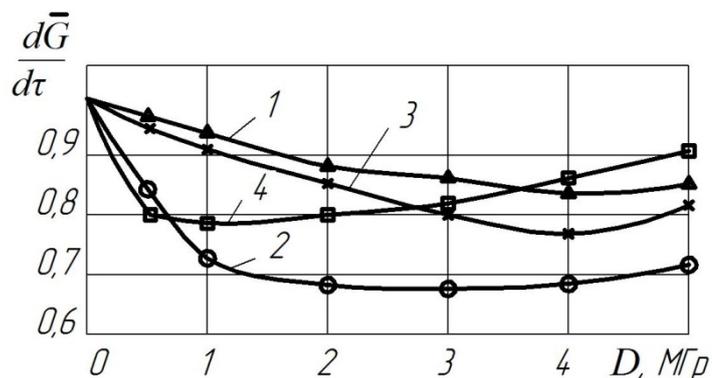


Рис.6. Зависимость относительной максимальной скорости потери массы эпоксидных полимеров от дозы облучения: 1 – ЭД-20, 2 – ЭДТ-10П, 3 – УП2127А, 4 – ЭЦТ-1.

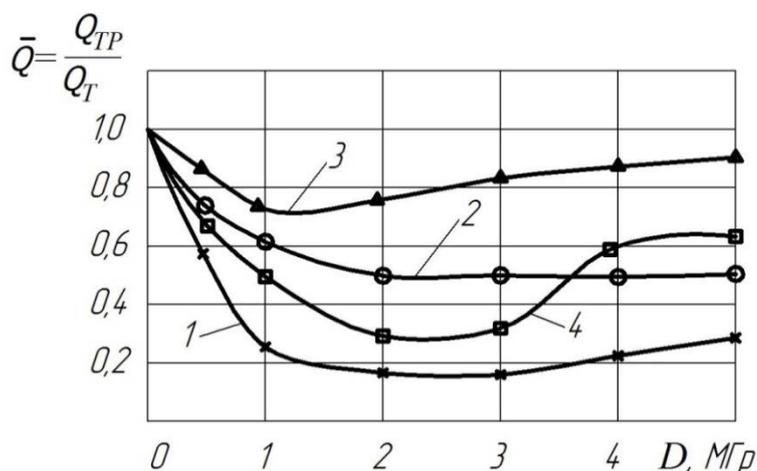


Рис.7. Зависимость относительной интегральной теплоты термического разложения эпоксидных полимеров от дозы облучения: 1 – ЭД-20, 2 – ЭДТ-10П, 3 – УП2127А, 4 – ЭЦТ-1.

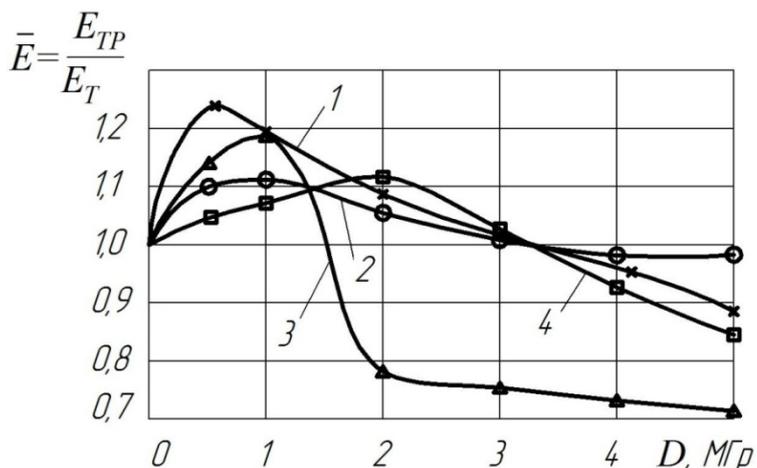


Рис.8. Зависимость относительной энергии активации эпоксидных полимеров от дозы облучения: 1 – ЭД-20, 2 – ЭДТ-10П, 3 – УП 2127А, 4 – ЭЦТ-1.

Аналогично ЭД-20 облучение ЭДТ-10П приводит к возникновению стерических затруднений при термическом разложении. Облучение дозами до 1 МГр повысило термостойкость с 240°C (термическое отверждение) до 250°C.

Характер термостойкости не изменяется практически до дозы 3 МГр. Температура максимальной скорости термодеструкции осталась без изменения (295°C). Уменьшение интегральной теплоты термического разложения (рис.7) обусловлено ростом числа двойных связей и ее стабилизацией при высоких дозах облучения свидетельствует о радиационной стойкости ЭДТ-10П. В целом она оказалась выше, чем у ЭД-20.

При радиационном облучении УП 2127А происходят значительные структурные изменения, о чем свидетельствуют кривые ДТА и ДТГ. Температура начала термической деструкции при облучении возрастает с 310°C до 340°C, а интенсивной термодеструкции – с 310°C (термическое отверждение) до 340°C при облучении дозой 1 МГр. Характер зависимостей \bar{E} , $d\bar{G}/dt$, \bar{Q} от дозы облучения свидетельствует о низкой радиационной стойкости УП 2127А.

Радиационное облучение полимера ЭЦТ-1 в целом слабо влияет на его структуру и термическое поведение, что обусловлено малыми величинами изменения энергии активации. Но следует отметить, что ЭЦТ-1 чувствителен к малым дозам облучения. Максимум эффекта приходится на 0,3-1,0 МГр. Величина максимальной скорости термического разложения (рис.6) изменяется слабо, а температура начала интенсивной термодеструкции возрастает с 280°C (термическое отверждение) до 295°C при облучении. При облучении не происходит значительных структурных изменений, в основном облучение влияет на интегральную теплоту термического разложения.

Таким образом, анализ поведения эпоксидных полимеров показывает, что радиация способствует наиболее полному завершению процессов полимеризации и, за исключением УП 2127А, почти не влияет на структурные характеристики. Сравнивая характеристики радиационной стойкости, следует отметить ЭДТ-10П, как наиболее устойчивое к действию радиации. ЭД-20 наиболее сильно изменяет свои свойства при облучении, хотя в целом является материалом с худшими характеристиками.

Изучение влияния облучения на механические характеристики композитов проводилось на кольцевых образцах, используя *NOL*-метод, растяжением полудисков согласно ГОСТ 25.603-82. Кольцевые образцы подвергались облучению электронов при энергии 1,3 МэВ и токе 7 мА ($P = 0,023$ МГр/с) (рис.9,10). Полученные данные показывают, что в диапазоне доз 1-2 МГр наблюдается дополнительное структурирование, максимальное значение которого сдвинуто в сторону меньших доз облучения, о чем свидетельствуют значения относительных изменений прочности и модуля упругости по отношению к образцам термического отверждения.

Сшивание представляет собой процесс, во время которого макромолекулярные цепи начинают соединяться друг с другом и, таким образом, создают пространственную сеть в структуре. В ходе обработки ионизирующим излучением могут происходить два действия: сшивание и расщепление макромолекул или дегградация. Оба эти процесса работают параллельно. Используя технологию сшивания, стандартные и технические полимеры могут приобретать более «дорогие» свойства высокотехнологичного полимерного материала и, таким образом, заменять эти материалы во многих областях применения.

Облучение действует на каждый полимер по-разному, но всегда, когда оптимальная доза была найдена, механические свойства возрастали до 36%.

Изменения микромеханических и термомеханических свойств были подтверждены структурными измерениями.

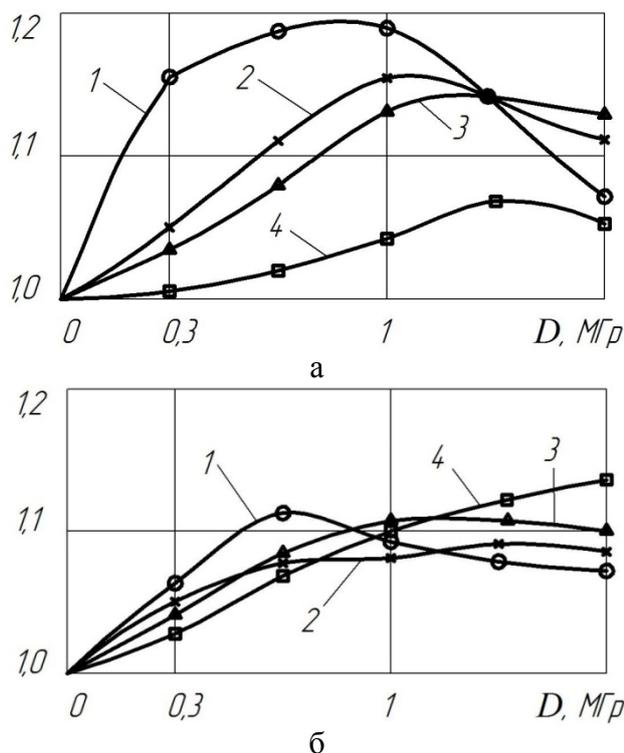


Рис.9. Зависимость относительной: прочности (а) и модуля упругости (б) композитов от дозы облучения (связующее ЭДТ-10П): 1 – ВМН-4, 2 – ВМС-8, 3 – РВМН, 4 – СВМ.

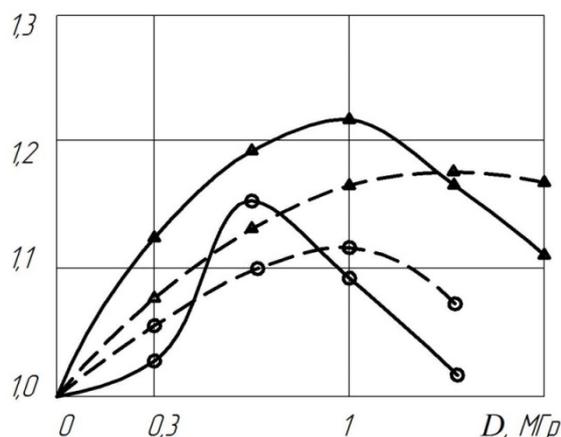


Рис.10. Зависимость относительной: прочности (—) и модуля упругости (----) композитов от дозы облучения (связующее ЭЦТ-1): 1 – ВМС-8, 2 -ВМН-4

Характер поведения кривых свидетельствует о том, что основным процессом, идущем в композитах, является сшивка, что подтверждается и в [26,35]. В результате облучения образуются дополнительные поперечные связи за счет возникновения реакционноспособных групп. В результате увеличивается плотность пространственной сетки, снижается уровень внутренних напряжений, увеличивается структурная однородность связующего, что ведет к повышению термостойкости материала. Действие ионизирующих излучений на материалы приводит к разрыву связей молекул и образованию свободных

радикалов. Хотя радикальный механизм превращения молекул под действием облучения является не единственным [26], но во многих случаях играет существенную роль.

ВЫВОДЫ

Анализ термограмм эпоксидных связующих ЭДТ-10П, ЭД-20, УП-2127А, ЭЦТ-1 показал, что при облучении эпоксидных связующих появляются два экзотермических пика, которые свидетельствуют об образовании дополнительных химических связей в полимере, приводящих к повышению адгезии и, как следствие, повышению механической прочности.

Расчет интегральной теплоты термического разложения показал, что при малых дозах облучения (до 1 МГр) происходит рост числа двойных связей, свидетельствующий о дополнительном отверждении под действием облучения.

Анализ поведения механических характеристик эпоксидных полимеров показал, что радиация способствует наиболее полному завершению процессов полимеризации и, за исключением УП 2127А, почти не влияет на структурные характеристики. ЭДТ-10П наиболее устойчиво к действию радиации, а ЭД-20 наиболее сильно изменяет свои свойства при облучении.

В диапазоне доз 1-2 МГр наблюдается дополнительное структурирование, образуются дополнительные поперечные связи за счет возникновения реакционноспособных групп, максимальное значение которых сдвинуто в сторону меньших доз облучения, в результате чего макромолекулярные цепи начинают соединяться друг с другом и, таким образом, создают пространственную сеть в структуре полимера. В результате увеличивается плотность пространственной сетки, снижается уровень внутренних напряжений, увеличивается структурная однородность связующего, что ведет к повышению термостойкости материала.

Полученные данные показывают, что в диапазоне доз 1-2 МГр наблюдается дополнительное структурирование, максимальное значение которого сдвинуто в сторону меньших доз облучения, о чем свидетельствуют значения относительных изменений прочности и модуля упругости по отношению к образцам термического отверждения.

Анализ поведения эпоксидных полимеров показал, что радиация способствует наиболее полному завершению процессов полимеризации и, за исключением УП 2127А, почти не влияет на структурные характеристики. ЭДТ-10П наиболее устойчиво к действию радиации, а ЭД-20 наиболее сильно изменяет свои свойства при облучении.

Характер поведения эпоксидных полимеров показал, что изменение их свойств зависит от химического состава материала и для связующих ЭД-20 и ЭДТ-10П предпочтительнее термическая полимеризация с последующим радиационным воздействием.

Действие ионизирующих излучений на материалы приводит к разрыву связей молекул и образованию свободных радикалов. Хотя радикальный механизм превращения молекул под действием облучения является не единственным, но во многих случаях играет существенную роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. *Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года* / Авиационные материалы и технологии: юбилейный научно-технический сборник (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. – С.7-17.
2. Новиков Л.С. *Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. Учебное пособие.* – М.: Университетская книга, 2010. – 192с.
3. Никитенко В.И., Крайнюков В.И. *Радиационные условия и радиационная безопасность при полете космических аппаратов.* – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2013. – 48 с.
4. Демина Е.А., Аукажиева Ж.М. *Обзор воздействия космической среды на космические аппараты* / XLII международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения». Сборник статей по материалам. – М.: ООО «Интернаука», 2020. – Т.11(39). – С.8-17.
5. Гришанина Т.В., Русских С.В., Шклярчук Ф.Н. *Нестационарные термоупругие колебания тонкостенного стержня, соединенного с космическим аппаратом, при солнечном нагреве* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т.21. – №4. – С.459-468.
6. Каблов Е.Н., Деев О.В., Старцев И.С., Никишин Е.Ф. *Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах* // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №10. – С.2-9.
7. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., Черепанов Р.О. *Высокоскоростное взаимодействие естественных и техногенных частиц с элементами космических аппаратов* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т.23. – №1. – С.117-133.
8. Бочкарев С.В., Галиновский А.Л., Барзов А.А., Казанцев В.П., Сысоев Н.Н., Коберник Н.В., Мазаева И.В., Чжэньюань Цзя. *Патент № 2748971 С1 Российская Федерация, МПК G01N 23/02. Способ оценки эффективности защитных экранов из композитных материалов:* №2020132200: заявл. 28.09.2020: опубл. 02.06.2021.
9. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Морозов Б.Б., Насонов Ф.А. *Кинетика разрушения при межслоевом сдвиге углепластика ВКУ-30 после воздействия СВЧ электромагнитного поля* // Конструкции из композиционных материалов. – 2023. – №1(169). – С.28-34.
10. Кондратов Д.В., Барулина М.А., Бекренев Н.В., Злобина И.В. *Исследование математической модели теплового нагрева композита под СВЧ воздействием* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2023. – Т.29. – №4. – С.558-571.
11. Филина Е.К., Голубев Е.С., Смирнов А.В. и др. *Влияние разброса физико-механических характеристик углепластика на температурную формостабильность панели главного зеркала космической обсерватории «Миллиметрон»* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2019. – Т.25. – №4. – С.509-521.
12. Иванов В.С. *Радиационная химия полимеров.* – Л.: Химия, 1988. – 320с.
13. Ping Ku. *Epoch resins: their manufacture and applications* // Adv. Polym. Technol. – 1988. – Vol.8. – No.1. – Pp.81-91.
14. Сидякин П.В., Карпов В.Л., Егоров Б.И. *О радиационно-химических превращениях в твердых эпоксидиановых смолах на основе 4,4'*

диоксидифенилпропана и эпихлоргидрина // Химия высоких энергий. – 1972. – №6. – С.84-85.

15. Бакаева В.П., Егорова З.С., Карпов В.Л. *Исследование действия ионизирующих излучений на эпоксидные смолы методом инфракрасной спектроскопии* / Всесоюзный симпозиум по спектроскопическим методам исследования структуры полимеров «Спектроскопия полимеров». Сборник докладов. – Киев: Наукова думка, 1968. – С.143-150.
16. Tagawa S., Washio M., Hayashi N., Tabata Y. *Pulse radiolysis studies on radiation resistance of epoxy resin* // J. of Nuclear Materials. – 1995. – Vol.133-134. – Pp.785-787.
17. Кузнецова М.Н., Мелешевич А.П. *Радиационное отверждение эпоксидно-акрилатных композиций γ -лучами ^{60}Co* // Вестник Харьковского политехнического института. – 1975. – №104. – Вып.7. – С.75-78.
18. Шишкин П.Г. *Влияние мощности облучения на механические характеристики связующего* // Прикл. механика. – 1969. – Т.5. – Вып.7. – С.106-110.
19. Омельченко С.И., Бокало Г.А. *Радиационно-химические превращения эпоксидных соединений* / Новые методы получения и исследования полимеров. Сборник научных трудов. – Киев: Наукова думка, 1978. – С.165-184.
20. Leno J.A., Cornist E.P., Gilbert A.R., Simpson W.E. *Pat. Англии №843437 Improvements in on relaning to the manufacture of Tube and Laminates.*
21. Aitken G., Sheldon R. *Irradiation studies on ongidride cured epoxy resin* // AERE. – 1966. – No.3339.
22. Аверченко В.П., Дубровский В.Б. *Изменение прочности эпоксидных компаундов при облучении нейтронами* // Труды МИСИ. – 1972. – №99. – С.98-104.
23. Биркина Н.А., Неверов А.Н., Бочарников В.А. *Радиационная стойкость эпоксидных смол* // Механика полимеров. – 1967. – №3. – С.475-482.
24. Евтушенко Е.Г., Мелешевич А.П. *Направление свободнорадикальных радиационно-химических превращений эпоксидных соединений в зависимости от их строения* // Техн. и эксп. химия. – 1988. – Т.24. – №6. – С.647-654.
25. Смехов Ф.М., Чернин И.З., Фартунин В.И., Тихомиров В.С. *Влияние ионизирующего излучения на структуру и свойства эпоксидных композиций* // Пластические массы. – 1986. – №10. – С.10-12.
26. Bullock R.E. *Mechanical of a boron-reinforced of its epoxy matrix* // J. Compos. Mater. – 1974. – Vol.8. – No.1. – Pp.97-101.
27. Bullock R.E. *Radiation effects on strengths of boron-epoxy composites in various environments* // J. of Nuclear Materials. – 1972. – Vol.105. – No.2. – Pp.175-184.
28. Wu S., Geeon S., Fouracre R.A., Tedford D.J. *The effect of irradiation on the electrical properties of epoxy resin systems* // J. of Nuclear Materials. – 1988. – Vol.151. – No.2. – Pp.140-150.
29. Конотоп Э.А., Стародуб Т.К., Хлановат Н.П. *Радиационная стойкость строительных стеклопластиков* / II Республиканская научно-техническая конференция «Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве». Тезисы докладов. Ч.1. – Харьков: ХИИКС, 1987. – С.90-91.
30. Берман Г.М., Соловьев В.Н., Болберов А.А. *Радиационная стойкость полимерных связующих, полимеррастворов и полимербетона* // Энергетическое строительство. – 1980. – №9. – С.52-54.

31. Омельченко С.И., Шлапацкая В.В., Бокало Г.А. и др. *Адгезия связующих к стекловолоконным наполнителям при радиационном отверждении* // Пластические массы. – 1980. – №8. – С.30-32.
32. Макаревич Ю.Л., Онискив В.Д., Столбов В.Ю., Гитман И. *Влияние гамма-облучения на прочностные свойства базальтокомпозитов* // Механика композитных материалов. – 2022. – Vol.58. – No.1. – Pp.59-74.
33. Sonoda K., Tani., Enomoto J., Murayama K. *Effect of space environmental conditions on mechanical properties of GFRP* / 16 th National SAMPE Technical Conference. – Covina, Calif. – 1984. – Vol.16. – Pp.621-632.
34. Куроленкин Е.И., Кузнецов Д.А., Костиков В.И. и др. *Изменение структуры и свойств углеродных волокон при облучении электронами* / Московская международная конференция по композитам. Тезисы докладов. – М.: АН СССР, 1990. – Ч.1. – С.13.
35. Mazio V.F., Huber G. *Effect of temperature, moisture and radiation exposures on composite mechanical properties* / 15th National SAMPE Technical Conference. Chic. – 1983. – Pp.234-250.
36. Wilson T.W. *Effect of ionizing radiation on an epoxy structural adhesive* / Polym. Mater. Sci. and Eng. Proc. ACS Div. – 1987. – Vol.36– Pp.105-109.
37. Гуняев Г.М., Душин М.И., Ивонин Ю.Н. и др. *Влияние натурной экспозиции в космосе на физико-механические свойства углепластика* // Механика композитных материалов. – 1983. – №2. – С.211-213.
38. Korukonda B., Connway J.C., Queency R.A., Diethorn W.S. *The effect of radiation and cryogenic temperature on the fatigue resistance of G-11CR glass-cloth/epoxy laminates* // J. of Nuclear Materials. – 1983. – Vol.113. – No.2-3. – Pp.197-202.
39. Левчук Л.И., Ольхович-Новосадюк Н.А., Панасюк В.Е. *Влияние воды на релаксацию напряжений в облученном эпоксидном стеклопластике* // Физико-химическая механика полимеров. – 1983. – Т.19. – №3. – С.121-123.
40. Смирнова В.К., Калинина Н.А., Ефремов Г.А. и др. *Радиационно-химическое структурирование эпоксиакрилатного олигомера и композиций на его основе* // Пластические массы. – 1989. – №4. – С.45-48.
41. Waber H.W., Kubasta E., Steiner W. et al. *Low temperature neutron and gamma irradiation of glassfiber reinforced epoxies* // J. of Nuclear Materials. – 1983. – Vol.113. – No.1. – Pp.11-13.
42. Любимов А.С., Кулешев И.В., Игонин Л.А., Бартенев Г.М. *Аномальное влияние дозы радиационного облучения эпоксидных полимеров на их механические свойства* // Механика композитных материалов. – 1983. – №1. – С.152-154.
43. Egusa S., Kirk M.A., Birtcher R.C. et al. *Mechanical properties of organic composite materials irradiated with 2 MeV electrons* // J. of Nuclear Materials. – 1983. – Vol.113. – No.2-3. – Pp.146-153.
44. McElroy P.M., Helms R.C. *Composite material technology requirements for large precision space structures* / 16th Nat. SAMPE Techn. Conf. – 1984. – Vol.16. – Pp.263-274.
45. Egusa S., Kirk M.A., Birtcher R.C. *Neutron irradiation effects on the mechanical properties of organic composite materials* // J. of Nuclear Materials. – 1984. – Vol.126. – No.2. – Pp.152-159.
46. Egusa S., Kirk M.A., Birtcher R.C., Hagiwara M. *Neutron and γ -ray irradiation effects in composite organicinsulators* // J. of Nuclear Materials. – 1985. – Vol.133-134. – Pp.795-799.

47. Heralovich C.T., Fox D.J., Sykes G.F. *Degradation of graphite-epoxy due to electron radiation* // Trans. ASME: J. Eng. Mater. and Technol. – 1988. – Vol.110. – No.2. – Pp.146-152.
48. Hurley G.F., Coltman R.R. *Organic materials for fusion reactor applications* // J. of Nuclear Materials. – 1984. – Vol.122-123. – No.1-3. – Pp.1327-1337.
49. Takeda N., Kawanishi S., Udagawa A., Hagiwara M. *Electron irradiation effects on interlaminar shear strength of glass or carbon cloth reinforced epoxy composites* // J. of Mater. Sci. – 1985. – Vol.20. – No.8. – Pp.3003-3010.
50. Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Соколенко И.В., Ястребинская А.В. *Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения* // Электронный научный журнал: Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – С.128.
51. 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. – Vol.16. – Iss.18. – 6231.
52. Слободкин Л.С., Пшеничная Г.Н., Барская М.Н. *Влияние метода и режимов термообработки на реализацию механических свойств композитных материалов* // Вестник АН БССР. Серия физико-энергетических наук. – 1987. – №4. – С.60-64.
53. Беляев Ю.В., Шведов Б.А. *Термогравиметрические исследования композиционных материалов* / Сборник трудов Московского лесотехнического института. – 1977. – Вып.97. – С.143-146.

REFERENCES

1. Kablov E.N. *Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologij ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii: yubilejnyj nauchno-tekhnicheskij sbornik. Moskva, VIAM, 2012, Pp.7-17.
2. Novikov L.S. *Radiatsionnye vozdeystviya na materialy kosmicheskikh apparatov. Uchebnoe posobie [Radiation effect on spacecraft materials]*. Moskva, Universitetskaya kniga, 2010, 192 p.
3. Nikitenko V.I., Krainiukov V.I. *Radiatsionnye usloviya i radiatsionnaya bezopasnost' pri polete kosmicheskikh apparatov [Radiation conditions and radiation safety during spacecraft flight]*. Moskva: Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N.Eh. Baumana, 2013, 48 p.
4. Demina E.A., Aukazhieva Zh.M. *Obzor vozdeystviya kosmicheskoy sredy na kosmicheskie apparaty [Overview of the impact of the space environment on spacecraft]*. XLII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya». Sbornik statej po materialam. Moskva, ООО “Internauka”, 2020, Pp.8-17.
5. Grishanina T.V., Russkikh S.V., Shkliarchuk F.N. *Nestatsionarnye termouprugie kolebaniya tonkostennogo sterzhnya, soedinennogo s kosmicheskim apparatom, pri solnechnom nagreve [Nonstationar thermoelastic oscillations of the connected with the spacecraft thin-walled rod with solar heating]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2015, Vol.21, No.4, Pp.459-468.
6. Kablov E.N., Deev 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. Ehntsiklopedicheskij spravochnik, 2012, No.10, Pp.2-9.*
7. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Iu.F., Cherepanov R.O. *Vysokoskorostnoe vzaimodejstvie estestvennykh i tekhnogennykh chastits s ehlementami kosmicheskikh apparatov [High-speed interaction of natural and technogenic particles with elements of space appliances]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2017, Vol.23, No.1, Pp.117-133.*
 8. Bochkarev S.V., Galinovskii A.L., Barzov A.A., Kazantsev V.P., Sysoev N.N., Kobernik N.V., Mazaeva I.V., Chzhen'iuan' Tszia. *Patent No.2748971 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK G01N 23/02. Sposob otsenki ehffektivnosti zashhitnykh ehkranov iz kompozitnykh materialov [Method for evaluating the effectiveness of protective shields made of composite materials]: No. 2020132200: zaiavl. 28.09.2020: opubl. 02.06.2021.*
 9. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Morozov B.B., Nasonov F.A. *Kinetika razrusheniya pri mezhsloevom sdvige ugleplastika VKU-30 posle vozdejstviya SVCH ehlektromagnitnogo polya [Kinetics of fracture during interlayer shear of carbon fiber reinforced plastic VKU-30 after exposure to a microwave electromagnetic field]. Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov, 2023, No.1(169), Pp.28-34.*
 10. Kondratov D.V., Barulina M.A., Bekrenev N.V., Zlobina I.V. *Issledovanie matematicheskoi modeli teplovogo nagreva kompozita pod SVCH vozdejstviem [Investigation of the mathematical model of thermal heating of the composite under microwave exposure]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2023, Vol.29, No.4, Pp.558-571.*
 11. Filina E.K., Golubev E.S., Smirnov A.V., Arkhipov M.Y., Lyakhovec A.O. *Vliyanie razbrosa fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik ugleplastika na temperaturnyuyu formostabil'nost' paneli glavnogo zerkala kosmicheskoi observatorii "Millimetron" [The effect of the variation in physical and mechanical CFRP properties on the primary mirror performance of the Millimetron space observatory]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2019, Vol.25, No.4, Pp.509-521.*
 12. Ivanov V.S. *Radiatsionnaya khimiya polimerov [Radiation chemistry of polymers]. Leningrad, Khimiya, 1988, 320 p.*
 13. Ping Ku. *Epoxy resins: their manufacture and applications. Adv. Polym. Technol., 1988, Vol.8, No.1, Pp.81-91.*
 14. Sidiakin P.V., Karpov V.L., Egorov B.I. *O radiatsionno-khimicheskikh prevrashheniyakh v tverdykh ehpoksidianovykh smolakh na osnove 4,4' dioksidifenilpropana i ehpihlorgidrina [On radiation-chemical transformations in solid epoxydian resins based on 4,4' dioxydiphenylpropane and epichlorohydrin]. Khimiya vysokikh ehnergij, 1972, No.6, Pp.84-85.*
 15. Bakaeva V.P., Egorova Z.S., Karpov V.L. *Issledovanie dejstviya ioniziruyushhikh izluchenij na ehpoksidnye smoly metodom infrakrasnoj spektroskopii Spektroskopiya polimerov [Investigation of the effect of ionizing radiation on epoxy resins by infrared spectroscopy]. Vsesoyuznyj simpozium po spektroskopicheskim metodam issledovaniya struktury polimerov "Spektroskopiya polimerov". Sbornik dokladov. Kiev, Naukova dumka, 1968, Pp.143-150.*
 16. Tagawa S., Washio M., Hayashi N., Tabata Y. *Pulse radiolysis studies on radiation resistance of epoxy resin. J. of Nuclear Material s., 1995, Vol.133-134, Pp.785-787.*

17. Kuznetsova M.N., Meleshevich A.P. *Radiatsionnoe otverzhenie ehpoksidno-akrilatnykh kompozitsij γ -luchami ^{60}Co [Radiation curing of epoxy-acrylate compositions by ^{60}Co γ -rays]. Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta, 1975, Vol.104, No.7, Pp.75-78.*
18. Shishkin P.G. *Vliyanie moshhnosti oblucheniya na mekhanicheskie kharakteristiki svyazuyushhego [Influence of irradiation power on mechanical characteristics of binder]. Prikladnaya mekhanika, 1969, Vol.5, No.7, Pp.106-110.*
19. Omel'chenko S.I., Bokalo G.A. *Radiatsionno-khimicheskie prevrashheniya ehpoksidnykh soedinenij [Radiation-chemical transformations of epoxy compounds]. Novye metody polucheniya i issledovaniya polimerov. Sbornik nauchnykh trudov. Kiev, Naukova dumka, 1978. Pp.165-184.*
20. Leno J.A., Cornist E.P., Gilbert A.R., Simpson W.E. *Patent 843437 Improvements in on relaning to the manufacture of Tube and Laminates.*
21. Aitken G., Sheldon R. *Irradiation studies on ongidride cured epoxy resin. AERE, 1966, 3339.*
22. Averchenko V.P., Dubrovskii V.B. *Izmenenie prochnosti ehpoksidnykh kompaundov pri obluchenii nejtronami [Strength change of epoxy compounds under neutron irradiation]. Trudy MISI, 1972, No.99, Pp.98-104.*
23. Birkina N.A., Neverov A.N., Bocharnikov V.A. *Radiatsionnaya stojkost' ehpoksidnykh smol [Radiation resistance of epoxy resins]. Mekhanika polimerov, 1967, No.3, Pp.475-482.*
24. Evtushenko E.G., Meleshevich A.P. *Napravlenie svobodnoradikal'nykh radiatsionno-khimicheskikh prevrashhenij ehpoksidnykh soedinenij v zavisimosti ot ikh stroeniya [Direction of free-radical radiation-chemical transformations of epoxy compounds depending on their structure]. Tekhnicheskaya i ehksperimental'naya khimiya, 1988, Vol.24, No.6, Pp.647-654.*
25. Smekhov F.M. Chernin I.Z., Fartunin V.I, Tikhomirov B.C. *Vliyanie ioniziruyushhego izlucheniya na strukturu i svojstva ehpoksidnykh kompozitsij [Influence of ionizing radiation on the structure and properties of epoxy compositions]. Plasticheskie massy, 1986, No.10. Pp.10-12.*
26. Bullock R.E. *Mechanical of a boron-reinforced of its epoxy matrix. J. Compos. Mater., 1974, Vol.8, No.1, Pp.97-101.*
27. Bullock R.E. *Radiation effects on strengths of boron-epoxy composites in various environments. J. of Nuclear Materials, 1972, Vol.105, No.2, Pp.175-184.*
28. Wu S., Geeon S., Fouracre R.A., Tedford D.J. *The effect of irradiation on the electrical properties of epoxy resin systems. J. of Nuclear Materials, 1988, Vol.151, No.2, Pp.140-150.*
29. Konotop E.A., Starodub T.K., Khlanovat N.P. *Radiatsionnaya stojkost' stroitel'nykh stekloplastikov [Radiation resistance of construction fiberglass plastics]. II Respublikanskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Primenenie plastmass v stroitel'stve i gorodskom khozyajstve". Tezisy dokladov. Chast' 1. Khar'kov, KHIKS, 1987, Pp.90-91.*
30. Berman G.M., Solov'ev V.N., Bolberov A.A. *Radiatsionnaya stojkost' polimernykh svyazuyushhikh, polimerrastvorov i polimerbetona [Radiation resistance of polymer binders, polymer mortars and polymer concrete]. Ehnergeticheskoe stroitel'stvo, 1980, No.9, Pp.52-54.*
31. Omel'chenko S.I., Shlapatskaia V.V., Bokalo G.A. et al. *Adgeziya svyazuyushhikh k steklovoloknistym napolnitelyam pri radiatsionnom otverzhenii [Adhesion*

- of binders to glass fiber fillers at radiation curing*]. *Plasticheskie massy*, 1980, No.8, Pp.30-32.
32. Makarevich Iu.L., Oniskiv V.D., Stolbov V.Iu., Gitman I. *Vliyanie gamma-oblucheniya na prochnostnye svojstva bazal'tokompozitov* [Effect of gamma irradiation on strength properties basalt composites]. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2022, Vol.58, No.1, Pp.59-74.
 33. Sonoda K., Tani., Enomoto J., Murayama K. *Effect of space environmental conditions on mechanical properties of GFRP*. 16th National SAMPE Technical Conference, Covina, Calif., 1984, Vol.16, Pp.621-632.
 34. Kurolenkin E.I., Kuznetsov D.A., Kostikov V.I. et al. *Izmenenie struktury i svojstv uglerodnykh volokon pri obluchanii ehlektronami* [Changes in the structure and properties of carbon fibers under electron irradiation]. *Moskovskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po kompozitam. Tezisy dokladov*. Moskva, Akademiya nauk SSSR, 1990, Vol.1, P.13.
 35. Mazio V.F., Huber G. *Effect of temperature, moisture and radiation exposures on composite mechanical properties*. 15th National SAMPE Technical Conference, 1983, Pp.234-250.
 36. Wilson T.W. *Effect of ionizing radiation on an epoxy structural adhesive*. *Polym. Mater. Sci. and Eng. Proc. ACS Div.*, 1987, Vol.36, Pp.105-109.
 37. Guniaev G.M., Dushin M.I., Ivonin Iu.N., Kvacheva L.A., Mikhailov V.V., Nikishin E.F., Startsev O.V. *Vliyanie naturnoj ehkspozitsii v kosmose na fiziko-mekhanicheskie svojstva ugleplastika* [Effect of natural exposure in space on the physicomechanical properties of fiberglass]. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1983, No.2, Pp.211-215.
 38. Korukonda B., Connway J.C., Queency R.A., Diethorn W.S. *The effect of radiation and cryogenic temperature on the fatigue resistance of G-11CR glass-cloth/epoxy laminates*. *J. of Nuclear Materials*, 1983, Vol.113, No.2-3, Pp.197-202.
 39. Levchuk L.I., Ol'khovich-Novosadiuk N.A., Panasiuk V.E. *Vliyanie vody na relaksatsiyu napryazhenij v obluchennom ehpoksidnom stekloplastike* [Water influence on stress relaxation in irradiated epoxy fiberglass]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika polimerov*, 1983, Vol.19, No.3, Pp.121-123.
 40. Smirnova V.K., Kalinina N.A., Efremov G.A. et al. *Radiatsionno-khimicheskoe strukturirovanie ehpoksiakrilatnogo oligomera i kompozitsij na ego osnove* [Radiation-chemical structuring of epoxyacrylate oligomer and compositions based on it]. *Plasticheskie massy*, 1989, No.4, Pp.45-48.
 41. Waber H.W., Kubasta E., Steiner W. et al. *Low temperature neutron and gamma irradiation of glassfiber reinforced epoxies*. *J. of Nuclear Materials*, 1983, Vol.113, No.1, Pp.11-13.
 42. Liubimov A.S, Kuleshev I.V., Igonin L.A., Bartenev G.M. *Anomal'noe vliyanie dozy radiatsionnogo oblucheniya ehpoksidnykh polimerov na ikh mekhanicheskie svojstva* [Anomalous influence of the radiation dose of epoxy polymers on their mechanical properties]. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1983, No.1, Pp.152-154.
 43. Egusa S., Kirk M.A., Birtcher R.C. et al. *Mechanical properties of organic composite materials irradiated with 2 MeV electrons*. *J. of Nuclear Materials*, 1983, Vol.113, No.2-3, Pp.146-153.
 44. McElroy P.M., Helms R.C. *Composite material technology requirements for large precision space structures*. *Hi-Techn. Rev.* 16th Nat. SAMPE Techn. Conf., 1984, Vol.16, Pp.263-274.

45. Egusa S., Kirk M.A., Birtcher R.C. *Neutron irradiation effects on the mechanical properties of organic composite materials* J. of Nuclear Materials, 1984, Vol.126, No.2, Pp.152-159.
46. Egusa S., Kirk M.A., Birtcher R.C., Hagiwara M. *Neutron and γ -ray irradiation effects in composite organicinsulators*. J. of Nuclear Materials, 1985, Vol.133-134, Pp.795-799.
47. Heralovich C.T., Fox D.J., Sykes G.F. *Degradation of graphite-epoxy due to electron radiation*. Trans. ASME: J. Eng. Mater. and Technol, 1988, Vol.110, No.2, Pp.146-152.
48. Hurley G.F., Coltman R.R. *Organic materials for fusion reactor applications*. J. of Nuclear Materials, 1984, Vol.122-123, No.1-3, Pp.1327-1337.
49. Takeda N., Kawanishi S. Udagawa A., Hagiwara M. *Electron irradiation effects on interlaminar shear strength of glass or carbon cloth reinforced epoxy composites*. J. of Mater. Sci., 1985, Vol.20, No.8, Pp.3003-3010.
50. Edamenko O.D., Iastrebinskii R.N., Sokolenko I.V., Iastrebinskaia A.V. *Nanonapolnennye polimernye kompozitsionnye radiatsionno-zashhitnye materialy aviatsionno-kosmicheskogo naznacheniya [Nano-filled polymer composite materials for radiation protection in the aerospace purpose]*. Ehlektronnyj nauchnyj zhurnal: Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2012, No.6, Pp.128.
51. 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, Vol.16, Iss.18, 6231.
52. Slobodkin L.S., Pshenichnaia G.N., Barskaia M.N. *Vliyanie metoda i rezhimov termoobrabotki na realizatsiyu mekhanicheskikh svoystv kompozitnykh materialov [Influence of the method and modes of heat treatment on the realization of mechanical properties of composite materials]*. Vestnik AN BSSR. Seriya fiziko-ehnergeticheskikh nauk, 1987, No.4, Pp.60-64.
53. Beliaev Iu.V., Shvedov B.A. *Termogravimetricheskie issledovaniya kompozitsionnykh materialov [Thermogravimetric studies of composite materials]*. Sbornik trudov Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta, 1977, Vol.97, Pp.143-146.

Поступила в редакцию 03 сентября 2024 года.

Сведения об авторах:

Бочкарев Сергей Васильевич – д.т.н., проф., Кафедра «Микропроцессорные средства автоматизации», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия; e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru

Кудрявцев Владимир Владимирович – асп., Кафедра «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия; e-mail: vladim77@yandex.ru