

УДК 681.183

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАЛКАНИМИДОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Черкашина Н.И., Павленко В.И., Соколенко И.В., Жаворонкова М.К.**

*ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,  
Белгород, e-mail: natalipv13@mail.ru*

Разработан композиционный материал на основе полиалканимидной матрицы, армированной нанотрубчатыми наполненными волокнами. По уровню прочностных свойств в широком интервале температур нанонаполненный полиалканимид может быть отнесен к термопластам конструкционного назначения. Прочность при разрыве при отрицательных температурах увеличивается, а при повышенных – снижается. Относительное удлинение при разрыве и ударная вязкость с повышением температуры возрастают, что объясняется увеличением молекулярной подвижности полимерной матрицы. Нанонаполненный полиалканимид отличается от ненаполненного материала повышенной жесткостью, прочностью и меньшей величиной технологической усадки. Термоциклирование стандартных образцов из нанонаполненного полимера в интервале температур от – 200 °С (жидкий азот) до + 250 °С показало, что исходный уровень физико-механических, теплофизических свойств и стабильность размеров образцов сохраняются на протяжении 300 циклов.

**Ключевые слова:** полиалканимидная матрица, нанотрубчатый наполнитель, свойства

## COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS POLIALKANIMIDOV FOR BIOLOGICAL PROTECTION OF THE PILOTED SPACECRAFTS

**Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Sokolenko I.V., Zhavoronkova M.K.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: natalipv13@mail.ru*

Composite material on the basis of the polialkanimidny matrix reinforced by the nanotubular filled fibers is developed. On the level of strength properties in a wide interval of temperatures nanofilled полиалканимид it can be carried to thermolayers of constructional appointment. Durability at a gap at negative temperatures increases, and at the raised – decreases. Relative lengthening at a gap and impact strength with temperature increase increase that is explained by increase in molecular mobility of a polymeric matrix. Nanofilled полиалканимид differs from unfilled material in the increased rigidity, durability and smaller size of technological shrinkage. Thermocycling of standard samples from the nanofilled polymer in the range of temperatures from – 200 °С (liquid nitrogen) to + 250 °С showed that the initial level of physicomechanical, heatphysical properties and stability of the sizes of samples remain throughout 300 cycles.

**Keywords:** polialkanimidny matrix, nanotubular filler, properties

Проблема безопасности человека в космосе до недавнего времени ограничивалась вопросами безопасности при околоземных полетах. Перспектива пилотируемых полетов в межпланетном пространстве (например, к Марсу и обратно с посадкой на него) выдвигает совершенно новые вопросы. На первый план выходит использование ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которые на сегодняшний день являются альтернативным источником энергии в случае освоения межпланетного космического пространства. Причем ЯЭУ может служить не только источником энергии для жизнеобеспечения экипажа и питания аппаратуры, но и средством, обеспечивающим движение, в том числе с помощью ядерного ракетного двигателя [1–16].

Космические ЯЭУ обладают рядом особенностей, отличающих их от наземных собратьев. Помимо конструктивных особенностей ядерного реактора, это, в первую очередь, особенности радиационной защиты.

Должна быть обеспечена биологическая защита персонала обитаемых космических объектов и сохранение работоспособности бортового оборудования космических аппаратов, в частности, систем компьютерного управления, так как полупроводниковая электроника весьма чувствительна к облучению. Причем безопасность не только от внешнего космического излучения, но и от излучения самого ядерного реактора. А это, в первую очередь, защита от нейтронного и гамма-излучения [17–24].

Решение указанных проблем возможно путем создания термо- и радиационно-стойких полимерных композиционных материалов на основе высокопрочной nanoармированной полиалканимидной матрицы [25–34].

### Цель исследования

Получить композиционные материалы на основе полиалканимидов, армированных нанотрубчатыми наполненными волокнами.

### Материалы и методы исследования

Композиционные материалы получали смешением порошкообразного полиалканимида и волокнистого борсодержащего хризотила состава  $MgO:SiO_2:B_2O_3 = 1,5:0,1:0,9$  (содержание атомов бора 10,9% масс) с последующей переработкой методом литья под давлением или горячего прессования. Способ переработки композиций определялся по показателю текучести расплава (ПТР).

### Результаты исследования и их обсуждение

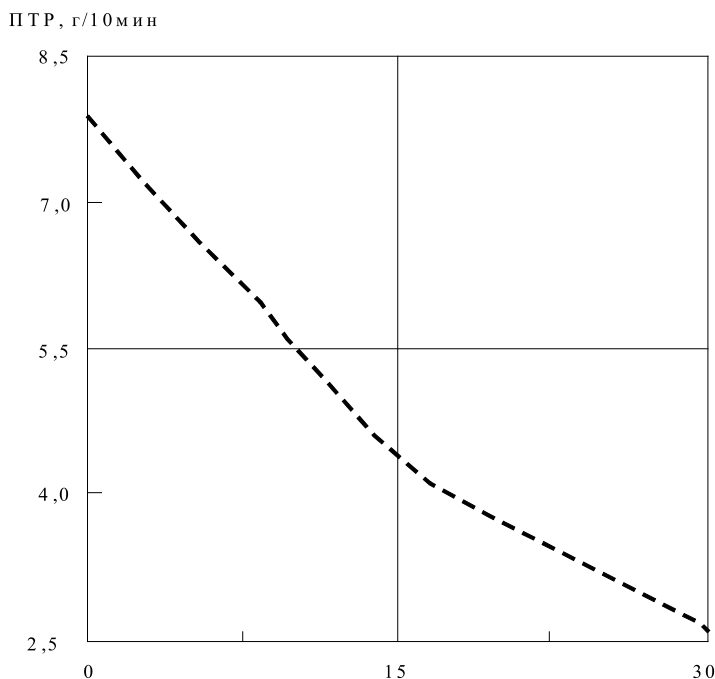
При введении в полиалканимид (ПАИ) волокнистого борсодержащего хризотила (ВБХ) наблюдается снижение ПТР (рисунок), что объясняется повышением вязкости системы.

Показатель текучести расплава наполненного полимера имеет достаточную для переработки литьем под давлением величину и с повышением температуры возрастает.

Наполнение термопласта ВБХ вызывает резкое снижение его деформируемости, особенно при небольших массовых долях наполнителя. Так, при 10%-м наполнении ПАИ относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_r$  уменьшается в 2,7 раза, а при дальнейшем увеличении степени наполнения снижение относительного удлинения при разрыве замедляется. Данный факт вызван повышением жесткости полимера.

Исходя из результатов термогравиметрического анализа (ТГА) ПАИ на воздухе можно заключить, что наполненный и ненаполненный ПАИ являются термостойкими полимерами. Их термостойкость, оцениваемая по 5% потери массы, составляет 418 и 416 °C соответственно.

Термические характеристики нанонаполненного ПАИ представлены в табл. 1.



Зависимость показателя текучести расплава ПАИ от массовой доли ВБХ

Таблица 1

### Термические характеристики ПАИ

Показатели	Ненаполненный образец	Нанонаполненный образец
Потеря массы при нагревании до 400 °C	2,5	3,5
Температура деструкции, °C:		
начала	396	400
окончания	580	575
Температура максимума разложения*, °C	474, 532	477, 516
Энергия активации, кДж/моль	245	370

Примечание. \*Для первой и для второй стадии разложения полимера.

Таблица 2

Зависимость свойств нанонаполненного полиалканимида от температуры

Температура испытаний, °С	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
- 60	141 (1,55)	10 (1,0)	31(1,11)
20	91 (1,00)	10 (1,0)	28 (1,00)
100	74 (0,81)	10 (1,0)	25 (0,79)
150	54 (0,59)	10 (1,0)	30 (1,07)
180	42 (0,46)	12 (1,2)	33 (1,18)
200	27 (0,30)	10 (1,0)	31(1,11)
220	27 (0,30)	10(1,1)	31(1,11)

Примечание. \* В скобках приведен коэффициент сохранения свойств (отношение текущего показателя свойства к показателю при комнатной температуре).

Таблица 3

Теплофизические характеристики ПАИ

Показатели	Ненаполненный образец	Нанонаполненный образец
Теплоемкость, Дж/(кг·К) при температуре, °С		
0	800	1245
60	1150	1328
150	1570	1436
200	1690	1512
Энтальпия, Дж/кг рекристаллизации плавления	8,0 28,7	5,1 19,2
Температура плавления, °С	297,7	299,8

По уровню прочностных свойств (табл. 2) в широком интервале температур нанонаполненный полиалканимид может быть отнесен к термопластам конструкционного назначения. Прочность при разрыве при отрицательных температурах увеличивается, а при повышенных – снижается. Относительное удлинение при разрыве и ударная вязкость с повышением температуры возрастают, что объясняется увеличением молекулярной подвижности полимерной матрицы.

Теплофизические характеристики нанонаполненного ПАИ представлены в табл. 3.

Нанонаполненный полиалканимид отличается от ненаполненного материала повышенной жесткостью, прочностью и меньшей величиной технологической усадки. Термоциклирование стандартных образцов из нанонаполненного полимера в интервале температур от – 200 °С (жидкий азот) до + 250 °С показало, что исходный уровень физико-механических, теплофизических свойств и стабильность размеров образцов сохраняются на протяжении 300 циклов.

### Заключение

Разработан композиционный материал на основе полиалканимидной матрицы,

армированной нанотрубчатými наполненными волокнами. По уровню прочностных свойств в широком интервале температур нанонаполненный полиалканимид может быть отнесен к термопластам конструкционного назначения.

*Работа выполнена при поддержке проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.2034.2014/К и гранта РФФИ, проект № 14-08-00325.*

### Список литературы

1. Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Соколенко И.В., Ястребинская А.В. Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 128.
2. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Композиционный материал, стойкий к воздействию высокоэнергетических излучений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 25–27.
3. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Бондаренко Ю.М. Перспективы создания современных высококонструкционных радиационно-защитных металлокомпозитивов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 27–29.
4. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Бондаренко Ю.М. Композиционный материал для радиационной защиты // Патент РФ №2470395, 20.12.2010.
5. Матюхин П.В., Ястребинский Р.Н. Исследование механизмов модифицирования поверхности природных

железородных минералов алкилсиликонатами // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48. – № 4. – С. 140.

6. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В., Бондаренко Г.Н. Полимеризация эпоксидного связующего в присутствии добавки полиметилсилоксана // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 82–87.

7. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В. Структурообразование и свойства легированных эпоксидных композитов // Строительные материалы. – 2004. – № 8. – С. 48–49.

8. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Полимерные радиационно-защитные композиты / Монография. – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 199 с.

9. Павленко В.И., Епифановский И.С., Ястребинский Р.Н., Куприева О.В. Термопластичные конструкционные композиционные материалы для радиационной защиты // Перспективные материалы. – 2010. – № 6. – С. 22–28.

10. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Черкашина Н.И. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 113–116.

11. Павленко В.И., Ястребинская А.В., Павленко З.В., Ястребинский Р.Н. Высокодисперсные органосиликоксановые наполнители полимерных матриц // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2010. – № 2. – С. 99–103.

12. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Ястребинская А.В. Полимерные диэлектрические композиты с эффектом активной защиты // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 62–66.

13. Павленко В.И., Липканский В.М., Ястребинский Р.Н. Расчеты процессов прохождения гамма-квантов через полимерный радиационно-защитный композит // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77, № 1. – С. 12–15.

14. Павленко В.И., Епифановский И.С., Ястребинский Р.Н. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. – 2006. – № 3. – С. 22.

15. Павленко В.И., Воронов Д.В., Ястребинский Р.Н. Радиационно-защитный тяжелый бетон на основе железорудного минерального сырья // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 40–42.

16. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Смоликов А.А., Дегтярев С.В., Воронов Д.В. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. – 2006. – № 2. – С. 47–50.

17. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Тяжелый бетон для защиты от ионизирующих излучений // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 48–49.

18. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Исследование тяжелого радиационно-защитного бетона после активации быстрыми нейтронами и гамма-излучением // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81. – № 4. – С. 661–665.

19. Павленко В.И., Смоликов А.А., Ястребинский Р.Н., Дегтярев С.В., Панкратьев Ю.В., Орлов Ю.В. Радиационно-защитный бетон для АЭС с РБМК на основе железо-серпентинитовых композиций с цементным связующим // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2004. – № 8. – С. 66.

20. Павленко В.И., Куприева О.В., Черкашина Н.И., Ястребинский Р.Н. Дефектность кристаллов модифицированного гидрида титана, подвергнутого термической обработке // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 125–129.

21. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Куприева О.В., Самойлова Ю.М. Радиационно-защитные транспортные контейнеры отработавшего ядерного топлива на основе высоконаполненной полимерной матрицы и железорудного сырья КМА // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам

конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством Белгородской области. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 320–330.

22. Соколенко И.В., Ястребинский Р.Н., Крайний А.А., Матюхин П.В., Тарасов Д.Г. Моделирование прохождения высокоэнергетических электронов в высоконаполненном полимерном композите // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 145–148.

23. Ястребинская А.В., Огрель Л.Ю. Разработка и применение композиционного материала на основе эпоксициановой смолы для строительных конструкций и теплоэнергетики // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 173.

24. Ястребинская А.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Коррозионно-стойкие полимеркомпозиты на основе эпоксидных и полиэфирных олигомеров для строительства // Перспективы развития строительного комплекса. – 2012. – Т. 1. – С. 243–247.

25. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Ястребинская А.В., Матюхин П.В. Структурообразование металло-олигомерных водных дисперсий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 121–123.

26. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Воронов Д.В., Павленко З.В., Самойлова Ю.М. Конструкционные радиационно-защитные композиционные материалы на основе модифицированных железорудных пород КМА // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством Белгородской области. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 491–499.

27. Ястребинская А.В., Павленко В.И., Матюхин П.В., Воронов Д.В. Механическая активация полимерных диэлектрических композиционных материалов в непрерывном режиме // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 74–77.

28. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Четвериков Н.А. Композиционный материал для защиты от гамма-излучения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 17–20.

29. Ястребинская А.В. Модифицированный конструкционный стеклопластик на основе эпоксидных олигомеров для строительных изделий: Автореф. дис. канд. техн. наук. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – 19 с.

30. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Ястребинская А.В., Черкашина Н.И. Модифицированные железоксидные системы – эффективные сорбенты радионуклидов // Перспективные материалы. – 2013. – № 5. – С. 39–43.

31. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И. Транспортный упаковочный комплект для радиоактивных отходов на основе радиационно-защитной полимерной матрицы / Перспективные материалы. – 2015. – № 6. – С. 25–31.

32. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Kuprieva O.V., Epifanovskii I.S. Thermoplastic constructional composite material for radiation protection // Inorganic Materials: Applied Research. – 2011. – Т. 2, № 2. – P. 136–141.

33. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Lipkanski V.M. Simulation of the processes of gamma-radiation transport through shielding containers for radioactive waste // Russian Physics Journal. – 2003. – Т. 46, № 10. – P. 1062–1065.

34. Pavlenko V.I., Yastrebinskij R.N., Degtyarev S.V. Modeling of processes of interaction of high-energy radiations with radiation-protective oxide of iron composites // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2005. – Т. 10, № 1–2. – P. 46–51.