

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ С РЕНТГЕНОЗАЩИТНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Кузнецов С.А.<sup>2</sup>, Иванов С.М.<sup>1</sup>, Волков А.Е.<sup>1</sup>, Терехин П.Н.<sup>1</sup>, Чердынцев В.В.<sup>3</sup>,  
Бойков А.А.<sup>3</sup>, Горшенков М.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182, Россия*

<sup>2</sup> *Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского «МАТИ», Москва*

<sup>3</sup> *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119049, Россия*

Полимерматричные композитные материалы обладают высокой устойчивостью к механическим и химическим воздействиям, а также специфическими свойствами, определяемыми количеством и материалом наполнителя. Для придания композиту радиационно-защитных свойств в качестве наполнителя использовался порошок карбида бора и нанопорошок вольфрама. С добавлением наполнителя ухудшаются механические свойства композита и увеличивается его плотность. Для эффективного практического использования композитов необходимо знать соотношения физических и радиационно-защитных свойств всех возможных составов. В работе представлен расчет удельных радиационно-защитных свойств для ряда композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с добавлением вольфрама и карбида бора. Представленные результаты позволяют оптимизировать состав композита по эффективности радиационно-защитных и механических свойств и удельному весу. Представлены результаты экспериментального исследования радиационно-защитных и механических свойств для ряда составов исследуемых композитов.

Ключевые слова: СВМПЭ, полимерматричный композит, радиационная защита, рентгенозащитный композит.

## ANALYSIS OF EFFICIENCY OF POLYMER-MATRIX UHMWPE-BASED COMPOSITES WITH X-RAY FILLERS

Kuznetsov S.A.<sup>2</sup>, Ivanov S.M.<sup>1</sup>, Volkov A.E.<sup>1</sup>, Terekhin P.N.<sup>1</sup>, Tcherdyntsev V.V.<sup>3</sup>,  
Boykov A.A.<sup>3</sup>, Gorshenkov M.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russia*

<sup>2</sup> *Russian State Technological University "MATI", Moscow, 121552, Russia*

<sup>3</sup> *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, 119049, Russia*

Polymer-matrix composite materials are highly resistant to mechanical and chemical influences, as well as specific properties determining the quantity and type of filler material. To make the composite radiation-protective properties, used boron carbide powder and tungsten nanopowder fillers. With the addition of the filler deteriorating of the mechanical properties of the composite occurs and increasing its density takes place. For efficient practical use of composites is necessary to know the relation of physical and radiation-protective properties of all possible compositions. This paper presents a calculation of specific radiation-protective properties for a series of composites based on the excess of high molecular weight polyethylene with the addition of tungsten and boron carbide. The results presented here allow to optimize the composition of the materials on the efficiency radiation protection and mechanical properties and specific weight. The paper presents the results of an experimental study of radiation-protective and mechanical properties for a range of compositions of investigated composites.

Keywords: UHMWPE polymer-matrix composite, radiation protection, X-ray protective composite.

### Введение

Полимерматричные композитные материалы обладают высокой устойчивостью к механическим и химическим воздействиям [5], а также возможностью иметь специфические свойства, определяемые типом наполнителя. Использование нанопорошков тяжелых металлов в качестве наполнителя позволяет придать композиту рентгенозащитные свойства [1; 3], а материалы, обладающие высокими рентгенозащитными свойствами, активно

исследуются [2; 6]. Это позволяет рассматривать такие материалы как перспективные для изготовления средств индивидуальной радиационной защиты (СИЗ) [1].

Наличие наполнителя и его физико-химические характеристики влияют не только на радиационные, но и на механические свойства композитов. Максимальными радиационно-защитными свойствами обладают композиты с максимальным содержанием наполнителя, однако большое количество наполнителя ухудшает механические свойства композита за счет ослабления полимерных связей [4]. Таким образом, количество наполнителя существенно влияет на баланс степени защиты и механических свойств.

Одним из наиболее критичных физических свойств композитов, используемых для изготовления СИЗ, является удельный вес композита, определяющий спектр возможностей его использования. Например, использование сверхтяжелого композита для изготовления защитного костюма сделает его крайне тяжелым и неудобным в работе. Однако возможно применение подобных составов композитов при разработке защиты приборов и элементной базы роботизированных устройств.

В работе представлен анализ удельных радиационно-защитных свойств композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с различным количеством наполнителя. В качестве наполнителя использовался порошок карбида бора ( $B_4C$ ) и нанопорошок вольфрама (W) с размером частиц 50-100 нм.

Разработана методика оценки эффективности составов композита, позволяющая оценивать соотношение их механо-физических и радиационных свойств. Изготовлены образцы композитов различных составов. Для этих композитов проведены экспериментальные измерения рентгенозащитных и механических.

## **Модели и методика расчета**

### ***Характеристики композита***

Состав композита определяет объемные доли наполнителя и полимера. Плотность композита рассчитывалась по формуле:

$$\rho_{\text{комп}} = \sum_i \rho_i \frac{\omega_{V_i}}{100\%} \quad (1)$$

где  $\rho_i$  – плотность элемента композита, а  $\omega_{V_i}$  – объемная доля  $i$ -го элемента композита,  $i=1,2,3$ .

Для оценки изменения свойств композита при увеличении удельного веса композита использована безразмерная величина, характеризующая тяжесть композита относительно воды:

$$Efm = \frac{m_{\text{воды}}}{m_{\text{комп}}} = \frac{\rho_{\text{воды}} V_{\text{комп}}}{m_{\text{комп}}} = \frac{\rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{комп}}} \quad (2)$$

где  $m_{\text{воды}}$  – масса воды в объеме, равном объему композита,  $m_{\text{комп}}$  и  $V_{\text{комп}}$  – объем и масса композита соответственно.

### **Методика расчета радиационно-защитных свойств**

Расчет радиационно-защитных свойств полимерматричных композитов проведен на основе методики, подробно представленной в работе [5]. В качестве характеристики радиационно-защитных свойств использовался коэффициент ослабления потока фотонов с энергией 122 кэВ:

$$K_{122} = \frac{N_0}{N} \quad (3)$$

где  $N_0$  - падающий поток,  $N$  - прошедший поток.

Для оценки удельных радиационно-защитных свойств композитов различного состава использовался массовый коэффициент  $\mu_m$ :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho_{\text{комп.}}} = \frac{\text{Ln}(K_{122})}{h\rho_{\text{комп.}}} \quad (4)$$

где  $h$  - толщина образца,  $\mu$  - линейный коэффициент ослабления.

### **Результаты расчетов**

Проведены расчеты рентгенозащитных свойств различных составов композитов. На основе данных, полученных в работе [5], выделены три группы композитов:

- а) композиты низкой плотности (содержание наполнителя  $W$  менее 30 весовых процентов),
- б) средней плотности (содержание наполнителя  $W$  от 30 до 60 весовых процентов),
- в) высокой плотности (содержание наполнителя  $W$  более 60 весовых процентов).

В каждой группе выбраны характерные составы. Так как низкое содержание наполнителя  $W$  не представляет интереса для радиационной защиты, минимальное рассмотренное количество наполнителя – 18 весовых процентов (w.%). Для каждого состава проведен расчет массовой плотности.

Проведен расчет рентгенозащитных свойств для каждого состава композита, рассчитаны  $K_{122}$  и  $\mu_m$ . Полученные результаты представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты расчета массовых коэффициентов ослабления.

Группа	Название состава	Количество наполнителя, w. %		Массовая плотность композита, г/см <sup>3</sup>	Массовый коэффициент ослабления, см <sup>2</sup> /г
		W <sub>n</sub>	B <sub>4</sub> C		
Низкой	СВМПЭ-20	20	-	1,14	0,995

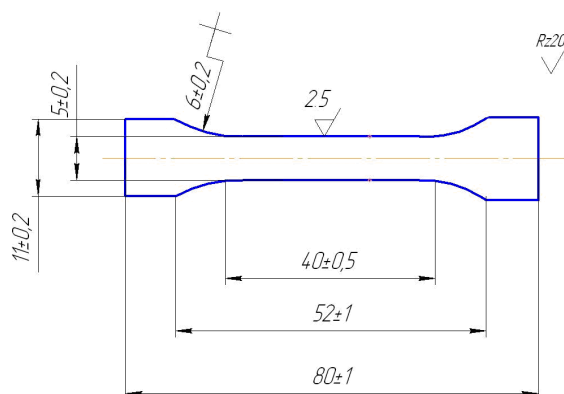
плотности	СВМПЭ-30	30	-	1,30	1,181
	СВМПЭ-18/12	18	12	1.24	0,712
Средней плотности	СВМПЭ-40	40	-	1,51	1,277
	СВМПЭ-30/20	30	20	1,58	1,362
	СВМПЭ-50	50	-	1,83	1,450
	СВМПЭ-60	60	-	2,17	1,588
Высокой плотности	СВМПЭ-70	70	-	2,79	1,821
	СВМПЭ-80	80	-	3,90	2,063
	СВМПЭ-90	90	-	6,49	2,302

### Экспериментальная часть

Изготовлено два вида образцов композитов каждого состава. Для радиационных исследований изготовлены образцы в форме круглых дисков (таблеток). Образцы для механических испытаний имели форму лопаток. Проведены экспериментальные исследования механико-физических и радиационно-защитных свойств изготовленных образцов.

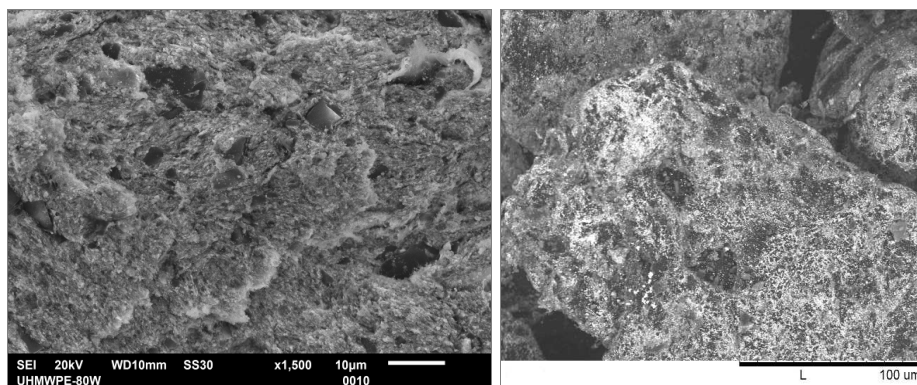
#### Методика изготовления образцов

Образцы для радиационных исследований имели форму плоских дисков толщиной 1, 2 и 3 мм, диаметром 50 мм, для испытаний на механические свойства – изготавливались в соответствии с ГОСТ 11262-80, параметры образца представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** – Образец – лопатка для определения физико-механических характеристик при растяжении, ГОСТ 11262-80

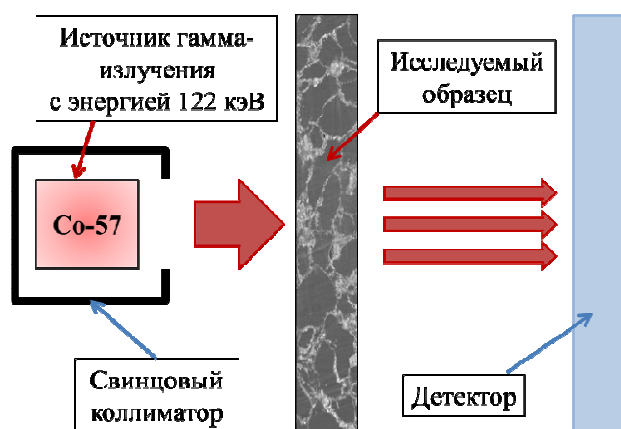
Композиты изготавливались на основе порошковой смеси исходных материалов методом механохимической обработки с последующим горячим прессованием под давлением 10 МПа. Подробно методика изготовления образцов на основе СВМПЭ с добавлением дисперсных наполнителей представлена в работе [5]. Фотографии излома образцов представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Излом композита СВМПЭ-70 под микроскопом.

### ***Радиационно-защитные свойства***

Методика эксперимента по определению радиационно-защитных свойств композита подробно представлена в [4]. Для исследования радиационно-защитных свойств образец устанавливался на пути гамма-излучения, создаваемого источником ( $Co-57$ ), за которым располагался детектор гамма-излучения. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Схема эксперимента по определению радиационно-защитных свойств.

В ходе эксперимента для каждого образца измерялись потоки гамма-излучения, регистрируемые детектором при наличии композита и без него. Согласно методике расчета рентгенозащитных свойств, представленной выше (см. ***Методика расчета радиационно-защитных свойств***), рассчитаны массовые коэффициенты ослабления для испытанных составов.

### ***Механические свойства***

Проведены испытания изготовленных образцов композитов на прочность, предел текучести, модуль упругости, относительная деформация при растяжении. На основании полученных экспериментальных диаграмм с использованием программного обеспечения TestXpert II проводился расчет пределов текучести, модуля упругости, относительного удлинения при разрыве. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.

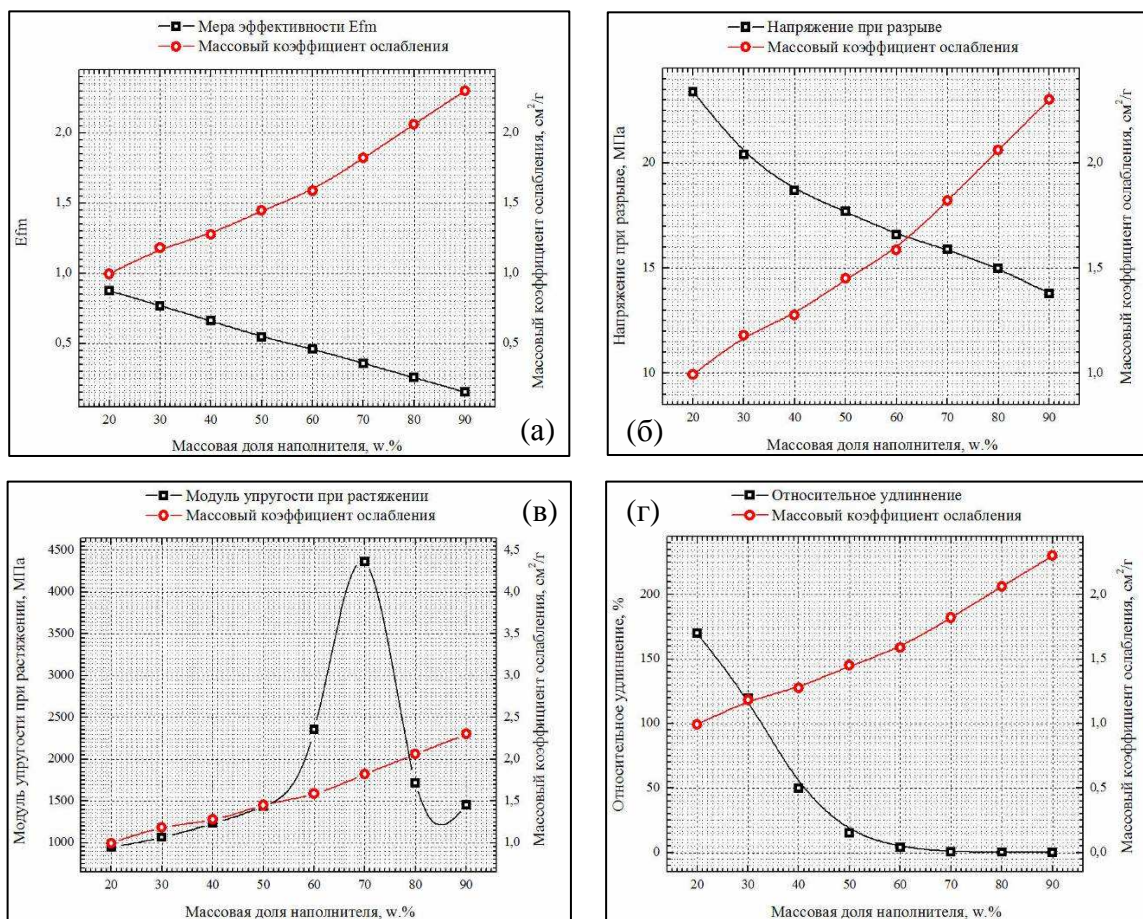
**Таблица 2.** Результаты механических испытаний композитов различных составов

Название образца	Напряжение при разрыве, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости при растяжении, МПа
СВМПЭ-20	$23,4 \pm 1,2$	$170 \pm 7$	$946 \pm 47$
СВМПЭ-30	$20,4 \pm 1,0$	$120 \pm 5$	$1066 \pm 43$
СВМПЭ-18/12	$19,1 \pm 1,1$	$90 \pm 4$	$1408 \pm 38$
СВМПЭ-40	$18,7 \pm 0,9$	$50 \pm 2$	$1231 \pm 49$
СВМПЭ-30/20	$18,0 \pm 0,9$	$1,9 \pm 0,3$	$398 \pm 14$
СВМПЭ-50	$17,7 \pm 0,7$	$15,2 \pm 0,5$	$1435 \pm 43$
СВМПЭ-60	$16,6 \pm 0,8$	$3,80 \pm 0,19$	$2354 \pm 94$
СВМПЭ-70	$15,9 \pm 0,6$	$0,50 \pm 0,05$	$4362 \pm 174$
СВМПЭ-80	$15,0 \pm 0,6$	$0,30 \pm 0,02$	$1717 \pm 86$
СВМПЭ-90	$13,8 \pm 0,7$	$0,20 \pm 0,01$	$1456 \pm 44$

### Анализ результатов

Для композитов с вольфрамовым наполнителем напряжение при разрыве с увеличением количества наполнителя падает медленно, почти линейно, относительное удлинение падает быстро, составляя для СВМПЭ-70 уже менее 1%. Модуль упругости имеет выраженный максимум для состава СВМПЭ-70. Введение карбида бора приводит к быстрому падению пластичности композита с увеличением содержания до 20 w.%. Состав СВМПЭ-30/20 обладает на порядок меньшим относительным удлинением по сравнению с аналогичным по объемной доле наполнителя СВМПЭ-50.

Полученные зависимости радиационно-защитных и ряда механических свойств композитов от объемной доли наполнителя представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** – Зависимости радиационно-защитных свойств композитов различных составов и их механические характеристики: (а) –  $E_{fm}$ , (б) – напряжение при разрыве, (в) – модуль упругости при растяжении, (г) – относительное удлинение

Массовый коэффициент ослабления монотонно растет с увеличением количества наполнителя. Выбор приоритетного параметра механических свойств для оценки эффективности состава композита выбирается в зависимости от предполагаемых условий использования.

## Выводы

Представлена методика оценки относительной эффективности полимерматричных композитов на основе СВМПЭ с различным содержанием наполнителя. Рассчитаны и экспериментально проверены радиационно-защитные свойства различных составов композита. Полученные данные позволяют сделать вывод о соотношениях радиационно-защитных и механических свойств для всех представленных составов композита.

На основе результатов проведенных экспериментов выделен интервал объемных долей наполнителя, в котором сочетание радиационно-защитных и механических свойств композита оптимально: от 50 до 80 весовых процентов. Показано существенное негативное влияние добавок карбида бора на механические свойства композита.



*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы», ГК 16.513.11.3148 от 15.06.2012.*

### Список литературы

1. Артемьев В.А. Об ослаблении рентгеновского излучения ультрадисперсными средами // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т. 23, № 6. - С. 5–9.
2. Bai J.B., Allaoui A. Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites – experimental investigation // Compos. A: Appl. Sci. Manuf. - 2003. - Vol. 34. - P. 689–694.
3. Fan G.H. et al. A novel radiation protection material: BaPbO<sub>3</sub>/Al composite // Materials and Design. - 2009. - Vol. 30. - P. 862–866.
4. Ivanov S.M. et al. // J. Alloys Comp. - 2013. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.12.107>.
5. Kaloshkina S.D., Tcherdyntsev V.V. Radiation-protective polymer-matrix nanostructured composites // Journal of Alloys and Compounds. - 2012. - Vol. 536. - № 25. - P. S522–S526.
6. Ounaies Z. et al. // Compos. Sci. Technol. - 2003. - Vol. 63. - P. 1637–1664.

### Рецензенты:

Калошкин С.Д., доктор физико-математических наук, директор института новых материалов и нанотехнологий НИТУ «МИСиС», г. Москва.

Томилин И.А., доктор химических наук, профессор-консультант кафедры физической химии НИТУ «МИСиС», г. Москва.