



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.533.9

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА–W ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. РОТКОВИЧ¹, Д. И. ТИШКЕВИЧ¹, С. А. ГЕРМАН^{1,2}, А. А. БОНДАРУК¹,
С. В. ЛЕОНЧИК¹, Е. С. ДАШКЕВИЧ¹, В. М. ФЕДОСЮК¹, А. В. ТРУХАНОВ¹

¹Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19.07.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. С использованием метода химического отверждения получены композиционные материалы на основе системы эпоксидная смола–W с варьированием содержания W от 0 до 80 %. Проведенное исследование микроструктуры образцов показало, что при увеличении содержания W наблюдается более равномерное распределение зерен в матрице эпоксидной смолы. Для образцов с содержанием наполнителя до 40 % отмечена агломерация зерен W. Статистический анализ размеров зерен исходного порошка W выявил, что вероятный их диаметр составляет 475 нм. Получены значения эффективной и относительной плотностей экспериментальных образцов с помощью метода Архимеда. Эффективная плотность изменялась в пределах от 1,16 до 4,36 г/см³ с увеличением содержания порошка W. Значения относительной плотности варьировались от 91 до 94 %, что свидетельствовало об отсутствии существенных дефектов при проведении испытания. Рентгеноструктурный анализ показал наличие фаз ОЦК-W и WO₂, что указывает на окисление W в тонком поверхностном слое материала. Моделирование в программном обеспечении Phy-X/PSD позволило оценить эффективность экранирования от гамма-излучения композиционных материалов при энергии излучения в диапазоне 0,8–2,5 МэВ. Образцы с содержанием наполнителя 60 и 80 % оказались наиболее подходящими для создания экранов радиационной защиты. Обнаружено, что добавление порошка W в эпоксидную матрицу способствовало уменьшению значений слоя половинного ослабления в 3,5 раза с 9,448 до 2,672 см для образцов с содержанием W 0 и 80 % соответственно при энергии излучения гамма-квантов 1,25 МэВ. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенных композиционных материалов в экранировании гамма-излучения, что делает их достойным вариантом для создания экранов радиационной защиты.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, радиационная защита, вольфрам, эпоксидная смола, моделирование, отверждение, гамма-излучение, композиционные материалы, полимер, экранирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Композиционные материалы системы эпоксидная смола–W для радиационной защиты от гамма-излучения / А. А. Роткович [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-5-13>.

COMPOSITE MATERIALS OF EPOXY RESIN–W SYSTEM FOR RADIATION SHIELDING AGAINST GAMMA RADIATION

ANASTASIA A. ROTKOVICH¹, DARIA I. TISHKEVICH¹, STEPAN A. GERMAN^{1,2},
ANASTASIA A. BONDARUK¹, SERGEY V. LEONCHIK¹, ELENA S. DASHKEVICH¹,
VALERY M. FEDOSYUK¹, ALEX V. TRUKHANOV¹

¹State Research and Production Association “Scientific and Practical Center of the National Academy
of Sciences of Belarus for Materials Science” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19.07.2023

Abstract. Composite materials based on the epoxy resin–W system with varying W content (0–80 %) were obtained using the method of chemical curing. Microstructural investigations of the samples showed that with increasing W content there is a more uniform distribution of grains in the epoxy resin matrix could be observed. Agglomeration of W grains is noted for samples with filler content up to 40 %. Statistical analysis of the grain size of the initial W powder revealed that the probable diameter of W grains is 475 nm. The values of effective and relative densities of the experimental samples were obtained using the Archimedes method. The effective density varied from 1.16 to 4.36 g/cm³ with W powder content rising. The relative density values received ranged from 91 to 94 %, indicating that there were no significant defects in the samples. X-ray diffraction analysis showed the presence of vcc-W and WO₂ phases, indicating the oxidation of W in the thin surface layer of the powder. Calculation in Phy-X/PSD software allowed to evaluate the gamma radiation shielding efficiency for the epoxy resin–W system composite materials in 0.8–2.5 MeV energy range. It was observed that samples with filler content of 60 and 80 % were the most suitable for radiation shielding. It was found that the addition of W powder to the epoxy matrix contributed to the reduction of half attenuation layer values by 3.5 times from 9.448 to 2.672 cm for samples with 0 and 80 % W content, respectively, for 1.25 MeV radiation energy. The obtained results demonstrate the high efficiency of the proposed composite materials for shielding gamma radiation, which makes them a perspective candidate for manufacturing radiation shields.

Keywords: ionizing radiation, radiation shielding, tungsten, epoxy resin, modeling, curing, gamma radiation, composite materials, polymer, shielding.

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

For citation. Rotkovich A. A., Tishkevich D. I., German S. A., Bondaruk A. A., Leonchik S. V., Dashkevich E. S., Fedosyuk V. M., Trukhanov A. V. (2023) Composite Materials of Epoxy Resin–W System for Radiation Shielding Against Gamma Radiation. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-5-13> (in Russian).

Введение

Ионизирующее излучение разрушает молекулы и молекулярные связи, что ведет к изменению химической структуры соединений [1]. Для защиты человека и оборудования от поражающего высокоэнергетического гамма-излучения применяют радиационные экраны, содержащие в своем составе такие высокоплотные материалы, как свинец и бетон. Однако эти материалы имеют высокие массогабаритные характеристики, при этом у свинца серьезный минус – значительные показатели токсичности [2]. Вследствие этого особое внимание уделяется разработке новых легких материалов с хорошей радиационной защитой. Такие материалы применяются в различных отраслях, например, в медицине, электронике, аэрокосмической и ядерной промышленности.

Проводилось множество исследований по радиационно-полимерной тематике с охватом и термопластичных, и терморезистивных полимеров. Такие материалы, как пластики и смолы, обладают низкими показателями плотности и имеют малый вес [3]. Полимерные материалы тоже характеризуются простотой обработки, долговечностью, химической и коррозионной стойкостью, хорошими адгезионными свойствами [4]. В целом композиционные материалы на основе эпоксидной смолы хорошо зарекомендовали себя для радиационной защиты благодаря ее отличной термической стабильности и длительной радиационной стойкости [5]. При этом эпоксидная смола является бюджетным и распространенным материалом. Все это делает композиционные материалы с эпоксидной матрицей перспективными для использования в качестве экранов радиационной защиты.

Композиты с такими наполнителями, как Bi-, W-содержащие соединения, ZnO, CdO и другими, неоднократно использовались для разработки экранирующих материалов [6]. Материалы же на основе углеродного волокна и тканей оказываются не так эффективны из-за наличия элементов с низким атомным номером (Z). В [7] выполнено исследование и сравнение наполнителей Bi₂O₃ (оксид висмута) и WO₃ (оксид вольфрама) с оксидом свинца PbO по способности к экранированию, а также изучено влияние микро- и наночастиц на значение массового коэффициента ослабления. Исследование подтвердило, что при использовании наноразмерных частиц Bi₂O₃, WO₃ и PbO (содержание 50 %) при энергии 0,3559 МэВ массовый коэффициент ослабления незначительно увеличивается по сравнению с микрочастицами и равняется 0,1099, 0,1097 и 0,1098 см²/г соответственно. Значения для образцов с компонентами Bi₂O₃ и WO₃ сравнимы с PbO, что доказывает возможность применения бессвинцовых материалов. Авторами исследованы микроструктура, химический и фазовый составы, плотность и параметры эффективности экранирования от гамма-излучения композиционных материалов системы эпоксидная смола–W.

Материалы и методы исследования

Композиционные материалы изготавливали из эпоксидной смолы ЭД-20 и порошка вольфрама W марки ПВЧ с добавлением отвердителя полиэтиленполиамина (ПЭПА). Массовое содержание вольфрама варьировалось от 0 до 80 % с шагом 20 %. Экспериментальные образцы были закодированы согласно шифру, приведенному в табл. 1. Схематичное представление методики эксперимента изображено на рис. 1.

Таблица 1. Кодовые названия композиционных материалов системы эпоксидная смола–W
Table 1. Code names of composite materials of epoxy resin system–W

Кодовое название / Code name	Содержание, % / Content, %	
	эпоксидной смолы / epoxy resin	вольфрама / tungsten
ЭП100	100	0
ЭП80В20	80	20
ЭП60В40	60	40
ЭП40В60	40	60
ЭП20В80	20	80

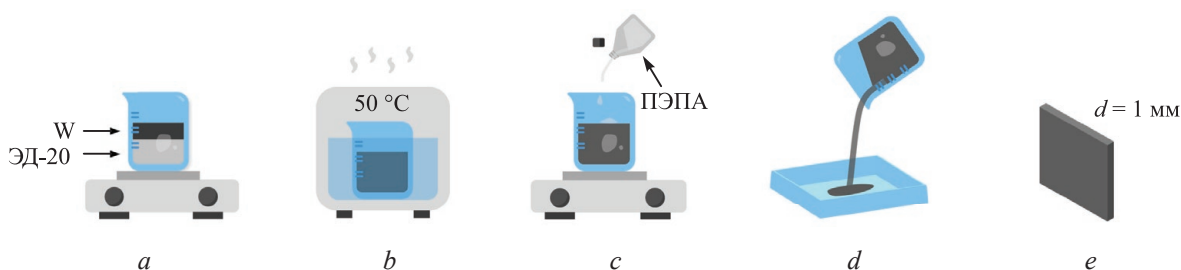


Рис. 1. Методика изготовления композиционных материалов системы эпоксидная смола–W
Fig. 1. Methodology of manufacturing of epoxy resin system–W composite materials

Эпоксидная смола и порошок вольфрама перемешивались в магнитной мешалке в течение 15 мин (рис. 1, a). Далее материалы поступали на водяную баню, нагретую до 50 °С (рис. 1, b). После остывания композитов добавляли отвердитель ПЭПА в количестве 10 % от массового содержания смолы, и образцы гомогенизировались 10 мин (рис. 1, c). Затем материалы заливали в силиконовые формы размерами ячеек 4,8×4,8 см (рис. 1, d). Отверждение образцов происходило в течение 24 ч. Постсинтезную обработку осуществляли с использованием шлифовально-полировального станка FORCIPOL 202.

Исследования морфологии и химического состава полученных композитов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss EVO 10 и приставки Oxford для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Исходные данные для статистическо-

го анализа распределения размеров зерен вольфрама, проводившегося с применением программного обеспечения SmartSEM, были собраны с трех СЭМ-снимков. Анализ структуры и фазового состава композиционных материалов системы эпоксидная смола–W осуществляли методом дифракции рентгеновских лучей на дифрактометре POWDIX 600/300. Измерения проводили в пределах $2\theta = 5^\circ\text{--}140^\circ$ с шагом $0,05^\circ$. Эффективную плотность образцов измеряли по методу Архимеда [8].

Моделирование параметров эффективности экранирования от гамма-излучения выполняли в программном обеспечении Phy-X/PSD для линейного коэффициента ослабления (ЛКО), слоя половинного ослабления (СПО) и средней длины свободного пробега (ДСП). Расчеты проводили в диапазоне энергий 0,8–2,5 МэВ для источника ^{60}Co .

ЛКО показывает относительное уменьшение плотности потока на единицу толщины вещества и определяется по формуле

$$\text{ЛКО} = \ln\left(\frac{I/I_0}{x}\right), \quad (1)$$

где I, I_0 – интенсивность падающего и прошедшего излучений; x – толщина материала, см.

Слой половинного ослабления определяет толщину вещества, необходимую для экранирования излучения наполовину:

$$\text{СПО} = \frac{0,693}{\text{ЛКО}}. \quad (2)$$

Средняя длина свободного пробега описывает расстояние, которое проходит гамма-квант без столкновений. Однако, чем больше количество столкновений, тем эффективнее экранируется поток излучения. Также эта величина является обратной ЛКО

$$\text{ДСП} = \frac{1}{\text{ЛКО}}. \quad (3)$$

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2, *a* представлен СЭМ-снимок исходного порошка вольфрама, а на рис. 2, *b* – диаграмма распределения его зерен.

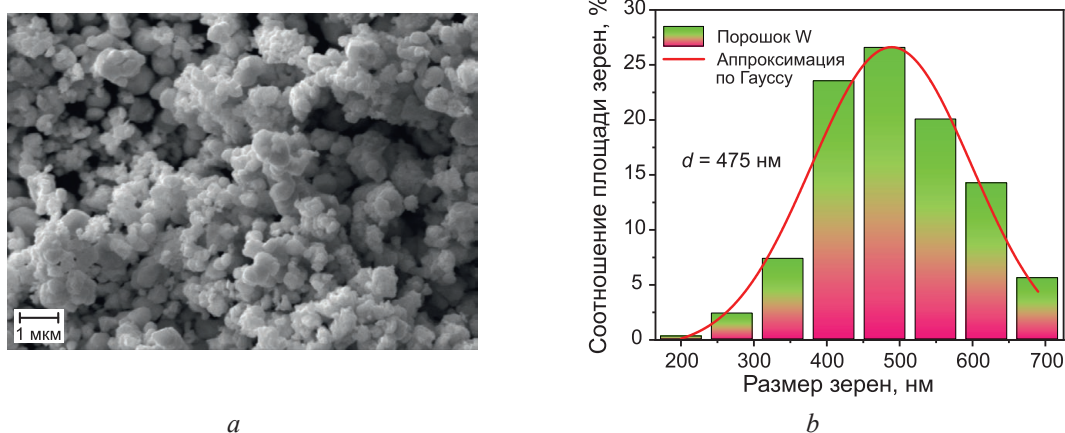


Рис. 2. Порошок вольфрама: *a* – исходный СЭМ-снимок; *b* – диаграмма распределения зерен
Fig. 2. Tungsten powder: *a* – original SEM image; *b* – grain distribution diagram

С целью определения наиболее вероятного размера зерен порошка W использовали функцию Гаусса для аппроксимации кривой распределения. Оптимальный диаметр зерен вольфрама – $d = 475$ нм (рис. 2, *b*). На рис. 3 представлены результаты СЭМ-исследования поперечного сечения композиционных материалов. Исследуемые образцы содержали W и полимерные составляющие С и О. На снимках рис. 3 приведены весовые содержания каждого элемента образца в процентном соотношении. Количественный состав W изменялся от 2,2 до 52,4 %.

Необходимо отметить, что вольфрам окисляется при температуре 415 °С, а это значит, что рентгеноструктурный анализ не должен был выявить оксидную фазу, поскольку в процессе синтеза образцы изготавливались при температуре не выше 50 °С. Наличие оксидной фазы можно объяснить лишь поверхностным явлением, которое заключается в процессе окисления тонкого поверхностного слоя исходного порошка даже при комнатной температуре. На дифрактограмме рис. 4, характерной для чистой эпоксидной смолы, можно увидеть аморфное гало (выделено красным кругом), как и ожидается при анализе аморфных веществ. Дифрактограммы для композиционных экспериментальных образцов не отличаются друг от друга, что говорит об отсутствии влияния условий синтеза на кристаллическую структуру композитов.

В табл. 2 представлены значения эффективной плотности композиционных материалов системы эпоксидная смола–W.

Таблица 2. Эффективная плотность композиционных материалов системы эпоксидная смола–W
Table 2. Effective density of composite materials of the epoxy resin system–W

Кодовое название / Code name	Эффективная плотность, г/см ³ / Effective density, g/cm ³
ЭП100	1,16
ЭП80В20	1,40
ЭП60В40	1,75
ЭП40В60	2,56
ЭП20В80	4,36

В процессе исследований установлено, что с ростом содержания порошка W от 0 до 80 % происходит увеличение эффективной плотности с 1,16 до 4,36 г/см³. Расчет относительной плотности показал, что ее значения изменяются в пределах 91–94 % (рис. 5).

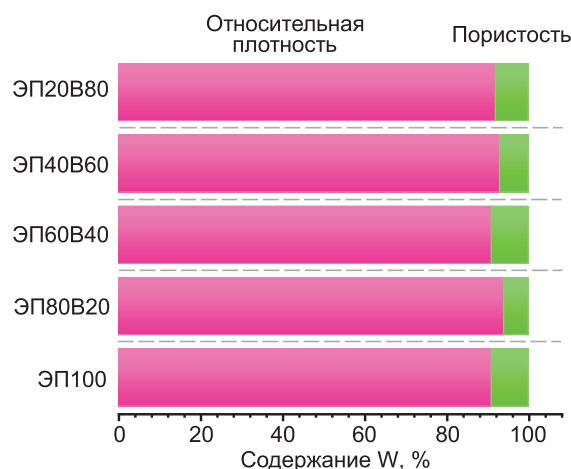


Рис. 5. Зависимость относительной плотности и пористости образцов композиционных материалов системы эпоксидная смола–W от процентного содержания наполнителя

Fig. 5. Dependence of relative density and porosity of samples of epoxy resin system–W composite materials on the filler content percentage

На рис. 6 приведены результаты расчетов в программе Phy-X основных параметров, описывающих эффективность экранирования гамма-излучения.

Как было отмечено ранее, чем больше значения ЛКО, тем выше эффективность экранирования. Согласно рис. 6, с увеличением энергии излучения от 0,8 до 2,5 МэВ значения ЛКО уменьшаются, и экранирующие свойства исследуемых образцов системы эпоксидная смола–W после действия энергии 1,25 МэВ значительно ослабевают (рис. 6, а). Например, линейный коэффициент ослабления образца ЭП20В80 при энергии излучения 1,25 МэВ имеет значение 0,235 см⁻¹, что практически на 31 % меньше, чем значение ЛКО (0,340 см⁻¹) при 0,80 МэВ. При этом образец с содержанием наполнителя 80 % обладает самыми высокими значениями ЛКО, по сравнению с остальными образцами.

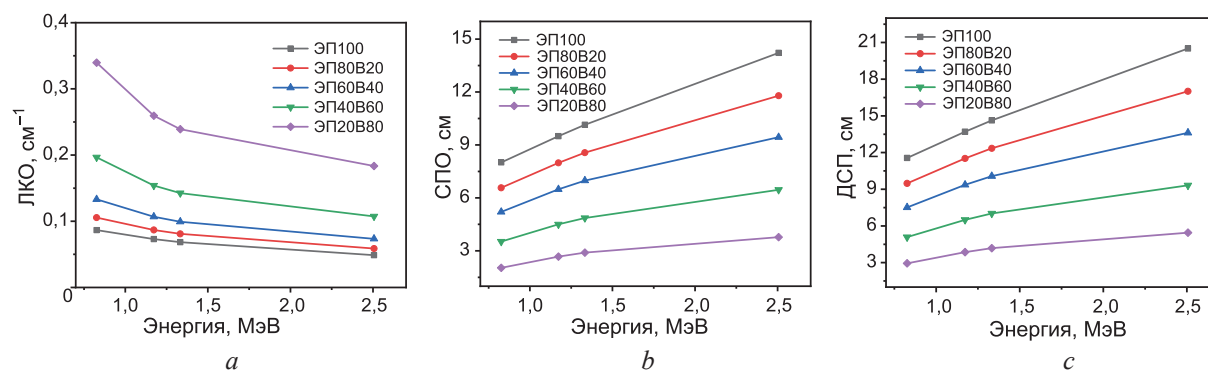


Рис. 6. Зависимости от энергии гамма-излучения образцов композиционных материалов системы эпоксидная смола–W: *a* – линейного коэффициента ослабления; *b* – слоя половинного ослабления; *c* – длины свободного пробега

Fig. 6. Dependences of gamma radiation energy on samples of composite materials of the epoxy resin system–W: *a* – linear attenuation coefficient; *b* – half-attenuation layer; *c* – free path length

То же можно сказать про результаты моделирования СПО (рис. 6, *b*). Композиционные материалы обладают сравнительно низкой плотностью, тогда как для ослабления более высоких энергий требуются образцы достаточно большой толщины. Таким образом, представленные материалы рекомендуется использовать при энергии излучения гамма-квантов до 1,25 МэВ, поскольку с ростом энергии излучения происходит значительное наращивание толщины образцов.

Следует отметить, что введение в систему до 80 % порошка вольфрама способствовало значительному снижению параметра СПО. Для сравнения, значения СПО при энергии излучения гамма-квантов 1,25 МэВ для образцов из чистой эпоксидной смолы и с максимальным содержанием вольфрама составляют 9,488 и 2,672 см соответственно. В связи с этим отмечено уменьшение значений СПО образцов в 3,5 раза. Результаты моделирования ДСП (рис. 6, *c*) коррелируют с результатами расчета СПО. Можно сказать, что среди композиционных материалов в системе эпоксидная смола–W образец ЭП20В80 выделяется экранирующими характеристиками, обладая существенно меньшими значениями ДСП. В частности, максимальные значения ДСП для образцов ЭП100 и ЭП20В80 составляют 20,512 и 5,449 см соответственно.

Таким образом, композиционные материалы системы эпоксидная смола–W с наполнением вольфрам от 80 % и более подходят в основном для создания экранов радиационной защиты благодаря высоким экранирующим свойствам и улучшенным масса-габаритным параметрам.

Заключение

1. Методом химического отверждения получены композиционные материалы системы эпоксидная смола–вольфрам с различным содержанием наполнителей (от 0 до 80 %). Исследование микроструктуры поперечного сечения образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии показало, что с увеличением массовой доли наполнителя наблюдается более однородное распределение зерен вольфрама в эпоксидной матрице. Отмечено возникновение скоплений агломератов зерен вольфрама для образцов с наполнителем до 40 %.

2. Проведен статистический анализ размеров зерен вольфрама, который показал, что наиболее вероятный размер зерен W составляет 475 нм. Значения эффективной плотности образцов получили экспериментальным методом, а относительной плотности – расчетным. Для системы эпоксидная смола–W при увеличении содержания порошка вольфрама эффективная плотность изменялась от 1,14 до 4,36 г/см³, относительная колебалась в пределах 91–94 %, что указывает на достаточно бездефектное проведение испытания.

3. С помощью рентгеноструктурного анализа оценена кристаллическая структура композиционных материалов. Анализ показал наличие фаз ОЦК-W и WO₂ для двух исследуемых систем. На дифрактограмме, соответствующей чистой эпоксидной смоле, наблюдались характерные широкополосные пики.

4. По итогам моделирования эффективности экранирования от ионизирующего излучения в программном обеспечении Phy-X/PSD получены значения таких параметров, как линейный

коэффициент ослабления, слой половинного ослабления и длина свободного пробега. Образцы ЭП40В60 и ЭП20В80 в наибольшей степени подходят для создания экранов радиационной защиты. Для полного поглощения энергии 1,25 МэВ потребуются образцы ЭП20В80 толщиной 2,672 см, а для экранирования такой же величины энергии – образец ЭП100 толщиной 9,448 см. Результаты исследования показывают возможность применения композитов в качестве экранирующих материалов от гамма-излучения благодаря отличным значениям параметров эффективности экранирования.

Список литературы / References

1. Hou Y., Li M., Gu Y., Yang Z. (2017) Gamma Ray Shielding Property of Tungsten Powder Modified Continuous Basalt Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composites. *Polymer Composites*. 39, 2106–2115.
2. Wani A. L., Ara A., Usmani J. A. (2015) Lead Toxicity: a Review. *Interdiscip Toxicol*. 8 (2), 55–64.
3. Trukhanov A. V., Tishkevich D. I., Podgornaya S. V., Kaniukov E., Darwish M. A., Zubar T. I., Timofeev A. V., Trukhanova E. L., Kostishin V. G., Trukhanov S. V. (2022) Impact of the Nanocarbon on Magnetic and Electrodynamical Properties of the Ferrite/Polymer Composites. *Nanomaterials*. 12, 868.
4. Lozitsky O. V., Vovchenko L. L., Matzui L. Y., Oliynyk V. V., Zagorodnii V. V. (2020) Microwave Properties of Epoxy Composites with Mixed Filler Carbon Nanotubes / BaTiO₃. *Applied Nanoscience*. 10, 2759–2767.
5. Mohammed J. R., Salman M., Jubier N. J., Salim A. A. (2021) Improved Gamma Radiation Shielding Traits of Epoxy Composites: Evaluation of Mass Attenuation Coefficient, Effective Atomic and Electron Number. *Radiation Physics and Chemistry*. 179, 109183.
6. Tishkevich D. I., Zubar T. I., Zhaludkevich A. L., Razanau I. U., Vershinina T. N., Bondaruk A. A., Zheleznova E. K., Dong M., Hanfi M. Y., Sayyed M. I., Silibin M. V., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V. (2022) Isostatic Hot Pressed W–Cu Composites with Nanosized Grain Boundaries: Microstructure, Structure and Radiation Shielding Efficiency against Gamma Rays. *Nanomaterials*. 12, 1642.
7. Verdipoor K., Alemi A., Mesbahi A. (2018) Photon Mass Attenuation Coefficients of a Silicon Resin Loaded with WO₃, PbO, and Bi₂O₃ Micro and Nano-Particles for Radiation Shielding. *Radiation Physics and Chemistry*. 147, 85–90.
8. Crawley A. F. (1974) Densities of Liquid Metals and Alloys. *International Metallurgical Reviews*. 19 (1), 32–48.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Роткович А. А., асп., мл. науч. сотр. лаборатории физики магнитных пленок Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению)

Тишкевич Д. И., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. лаборатории физики магнитных пленок НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Герман С. А., лаб. лаборатории физики магнитных пленок НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, студент Белорусского национального технического университета

Бондарук А. А., асп., мл. науч. сотр. лаборатории физики магнитных пленок НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Information about the authors

Rotkovich A. A., Postgraduate, Junior Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films of State Research and Production Association “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science” (SPC of the NAS of Belarus for Materials Science)

Tishkevich D. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

German S. A., Laboratory Assistant at the Laboratory of Physics of Magnetic Films of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science, Student at the Belarusian National Technical University

Bondaruk A. A., Postgraduate, Junior Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Леончик С. В., канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. тугоплавкой керамики и наноматериалов НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Дашкевич Е. С., науч. сотр. лаборатории физики магнитных пленок НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Федосюк В. М., чл.-корр., д-р физ.-мат. наук, проф., ген. дир. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Труханов А. В., д-р физ.-мат. наук, акад.-секр. отделения химии и наук о Земле НАН Беларуси, вед. науч. сотр. лаборатории физики магнитных пленок НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 19
Государственное научно-производственное
объединение «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению»
Тел.: +375 17 367-00-26
E-mail: rottkovich@gmail.com
Роткович Анастасия Александровна

Leonchik S. V., Cand. of Sci., Head of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Dashkevich E. S., Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Fedosyuk V. M., Corr. Member, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, General Director of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Trukhanov A. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Academician-Secretary of the Department of Chemistry and Geosciences of the NAS of Belarus, Senior Researcher at the Laboratory of Magnetic Film Physics of SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 19
State Research and Production Association
“Scientific and Practical Center
of the National Academy
of Sciences of Belarus for Materials Science”
Tel.: +375 17 367-00-26
E-mail: rottkovich@gmail.com
Rotkovich Anastasia Alexandrovna