

Г. В. ЛІСАЧУК, Р. В. КРИВОБОК, А. В. ЗАХАРОВ, М. С. МАЙСТАТ, В. В. ВОЛОЩУК, В. В. САРАЙ

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РАДІОПОГЛИНАЮЧОЇ КЕРАМІКИ

Об'єктом роботи є технологія виготовлення радіопоглинаючої кераміки на основі облицювальної плитки з додаванням карбиду кремнію. Для визначення фізичних властивостей використовувався метод гідростатичного зважування у воді. Визначали також рентгенофазовий аналіз та спектральні характеристики – коефіцієнти передачі та відбиття, у діапазоні частот 25,8 - 37,5 ГГц. Плитка складеться з двох шарів. Спочатку окремо отримують прес-порошок для I і II шару з сировинних матеріалів в заданій кількості, які зважували, зволожували, мололи в шаровому млині; шлікер висушували в сушильній шафі потім подрібнювали та пропускали крізь відповідне сито. Зволожений прес-порошок для I шару, відважували та засипали в форму для пресування, після чого зволожений прес-порошок для II шару, відважували та досипали в форму для пресування. Отриманий сирець висушували. Напівфабрикат покривали поливою та ставили в сушильну шафу. Готовий напівфабрикат випалювали у силітвовій печі. Виготовлена за розробленою технологією двошарова плитка з полив'яним покриттям характеризувалась наступними характеристиками: водопоглинання – 9,8 % уявна густина – 1,90 г/см<sup>3</sup>. Розроблену кераміку, згідно класифікації-ідентифікації, можна віднести до класу радіопоглинаючої кераміки.

**Ключові слова:** радіопоглинання, композиційна кераміка, двошарова плитка, карбід кремнію, водопоглинання, відкрита поруватість, уявна густина, рентгенофазовий аналіз, коефіцієнт передачі, коефіцієнт відбиття.

**Вступ.** Висока концентрація електромагнітного випромінювання яке впливає на людину та при високій її інтенсивності [1–4] викликає проблеми з центральною нервовою системою, підвищується втомлюваність, погіршується зір та негативно впливає [5, 6] на технічні характеристики електронних пристроїв.

Традиційні металеві сплави та ферити [7–10] не є практичними в чистому вигляді через економічні та технічні аспекти. Тому більш раціонально використовувати добавки для запобігання впливу електромагнітного випромінювання, які вводять у діелектричну матрицю для зменшення питомого об'ємного опору і збільшення магнітної проникності матеріалів. В більшості композиційних матеріалів використовують органічні речовини [11], які є токсичними, горючими та мають низьку міцність (смола, гума, фарба, лак тощо). Використання кераміки як матриці може усунути ці недоліки.

Виготовлення радіопоглинаючої кераміки, важливе не тільки для України та Європейського Союзу, але й для світу. Тому основна задача дослідження полягає в розробці технології

виготовлення радіопоглинаючої кераміки з полив'яним покриттям, яка має захисні властивості від електромагнітного випромінювання.

**Методика проведення досліджень.**

При проведенні досліджень використовували методи визначення водопоглинання, уявної густини, відкритої поруватості у відповідності з ГОСТ 24409-80. Експериментальні значення показників визначали як середнє арифметичне з 3 вимірювань.

Досліджування електродинамічних характеристик зразків – коефіцієнтів передачі та відбиття, проводили у діапазоні частот 25,8 – 37,5 ГГц. Використовували стандартні прямокутні хвилеводи перерізом 7.2 x 3.4 мм<sup>2</sup>. Зразки, які досліджувалися, повністю перекривали переріз хвилеводу та мали товщину - 1,5 мм. Для визначення параметрів взаємодії електромагнітного випромінювання зі зразками була використана модернізована стандартна апаратура – вимірювач коефіцієнту стоячої хвилі та ослаблення у складі генераторного блоку Р2-65 з індикатором Я2Р-67. Визначення коефіцієнта передачі проводилося по схемі, приведеній на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки для визначення коефіцієнту передачі:  
1,3 – напрямлені відгалужувачі; 2 – хвилевід із зразком; 4 – узгоджене навантаження

Коефіцієнт передачі визначався по шкалі ослаблення вимірювача Р2-65 в децибелах.

При переорієнтації напрямленого відгалужувача 3 на 180° вимірювався коефіцієнт стоячої хвилі.

© Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Майстат М.С., Волощук В.В., Сарай В.В., 2021

За формулою (1) розраховувався коефіцієнт відбиття в децибелах:

$$k_{\text{відбит}} = 20 \cdot \lg((k_{\text{сх}} - 1)/(k_{\text{сх}} + 1)) \quad (1)$$

де  $k_{\text{відбит}}$  – коефіцієнт відбиття, дБ;  
 $k_{\text{сх}}$  - коефіцієнт стоячої хвилі, дБ.

Фазовий склад дослідних зразків визначали за допомогою методу рентгенофазового аналізу із застосуванням дифрактометра ДРОН-3М з  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванням та нікелевим фільтром при стандартних умовах його роботи. Для класифікації ідентифікації фаз використовували американську картотеку American Society for Testing and Materials (ASTM) [12].

#### Експериментальна частина

Вибір керамічної маси проводили виходячи з умови найменшої температури і часу випалу, враховуючи, що добавка може окислюватися, вигоряти або взаємодіяти з діелектричною матрицею. В даній роботі розглядалась керамічна маса для виробництва плитки внутрішнього облицювання стін. Функціональна схема виготовлення радіопоглинаючої кераміки показана на рис. 2. Прийом та підготовка вихідних компонентів

виготовлення радіопоглинаючої кераміки повинна забезпечити для кожного компонента керамічної маси заданий хіміко-мінералогічний склад, необхідний ступінь чистоти, а також фізичний стан та вологість, які необхідні для подальшої переробки.

Підготовка вихідних компонентів повинна забезпечити кожному компоненту керамічної маси заданий хіміко-мінералогічний склад, необхідну ступінь чистоти, і навіть фізичний стан і вологість, необхідні подальшої переробки.

Ця стадія включає загальні складові підготовчих операцій технології:

1) процеси збагачення (або «упорядкування») мінеральної сировини, тобто, наприклад, промивання водою;

2) сортування, магнітну або ситову сепарацію; хімічне очищення та інші способи видалення шкідливих домішок;

3) попереднє дроблення;

4) сушіння сировини до вологості, що забезпечує можливість подрібнення;

5) попередню термічну обробку (випал), що забезпечує необхідні фазові перетворення, ущільнення та видалення летких компонентів.

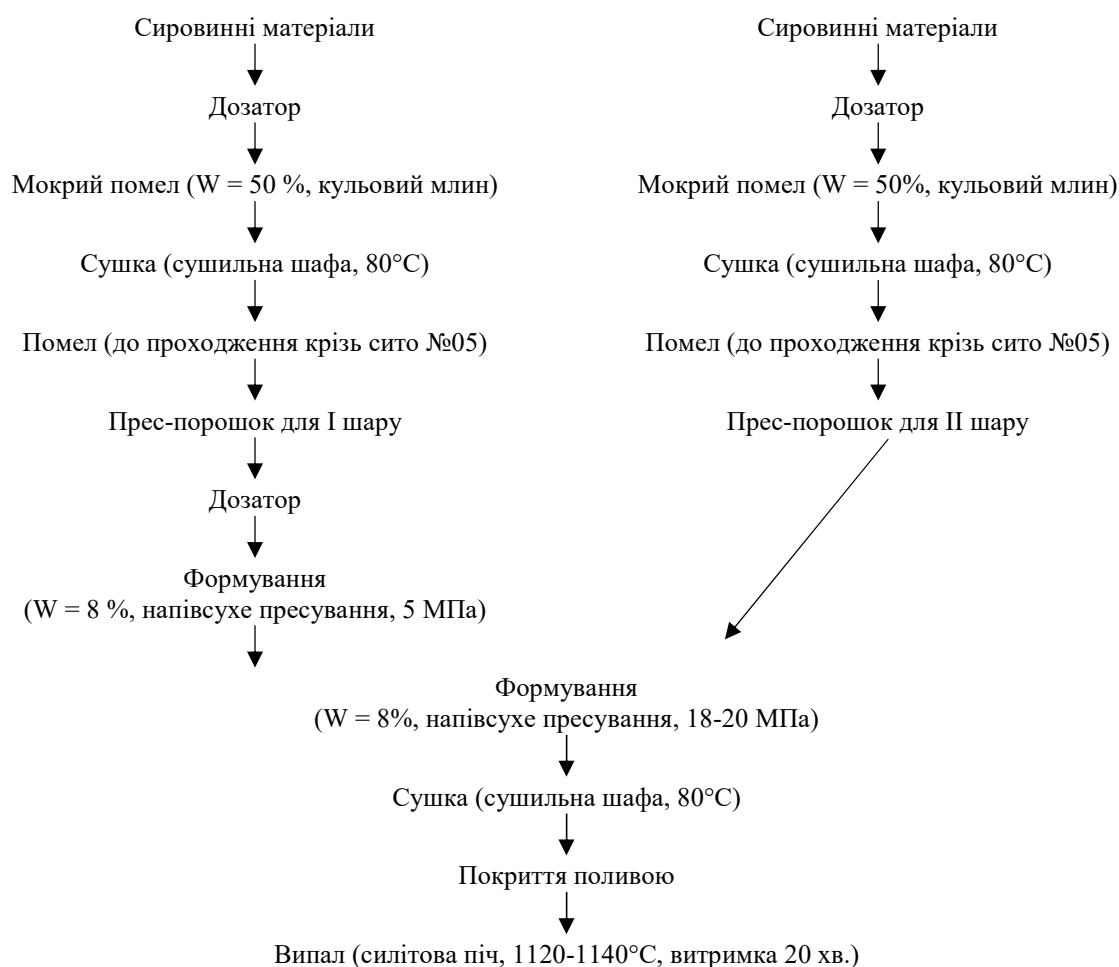


Рисунок 2 – Функціональна схема виготовлення радіопоглинаючої кераміки

Таблиця 1 – Шихтові складові для плитки

Найменування сировинних матеріалів	Масовий вміст матеріалів, мас. %			
	II шар	I шар		
		1	2	3
Глина Андріївська	43,00	38,70	34,40	30,10
Гранітні відсів	13,00	11,70	10,40	9,10
Карбід кремнію	-	10,00	20,00	30,00
Пісок кварцовий	29,04	26,14	23,23	20,33
Крейда подрібнена	8,03	7,23	6,42	5,62
Плитковий бій	6,93	6,24	5,54	4,85

Плитка складеться з двох шарів (рис.3). Шихтові склади для I та II шарів для плитки показано табл.1.

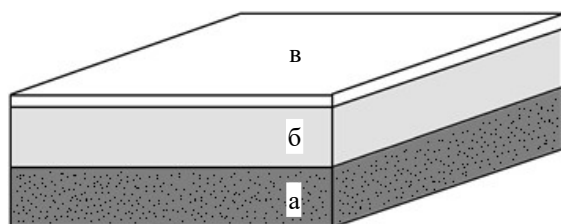


Рис. 3 – Схематичне розташування шарів в плитці:  
а) I шар; б) II шар; в) полива

Прес-порошок для I і II шару отримували окремо з сировинних матеріалів в заданій кількості, які зважували, зволожували, мололи в шаровому млині; шлікер висушували в сушильній шафі потім подрібнювали та пропускали крізь сито №05.

Спочатку прес-порошок для I шару зволожений до 8%, відважували та засипали в форму для пресування, сила тиску становила 5 МПа, після чого

прес-порошок для II шару зволожений до 8%, відважували та досипали в форму для пресування, сила тиску становила 18 – 20 МПа. Отриманий сирець висушували.

Далі напівфабрикат покривали поливою та ставили в сушильну шафу.

Готовий напівфабрикат випалювали у силітовій печі за температури випалу 1120–1140 °С, з витримкою за максимальної температури 20 хв.

#### Результати досліджень та їх обговорення

На початку дослідження визначали фізичні властивості зразків окремо для I та II шарів. Потім для кращого дослідженого зразка I шару визначали його спектральні характеристики коефіцієнта передачі та відбиття, а далі проводили його рентгенофазовий аналіз.

Для двошарової плитки виготовленої за розробленою технологією з використанням кращої маси для I шару та провели дослід з визначення водопоглинання, уявної густини та відкритої поруватості.

Результати проведених дослідів наведені на рис. 4–6.

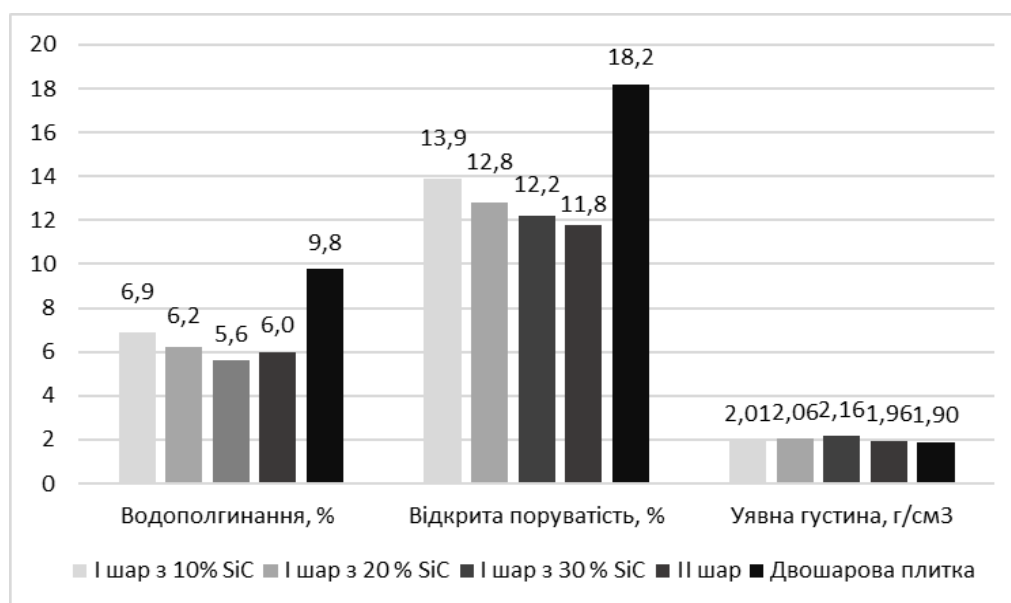


Рис. 4. Фізичні властивості дослідних зразків

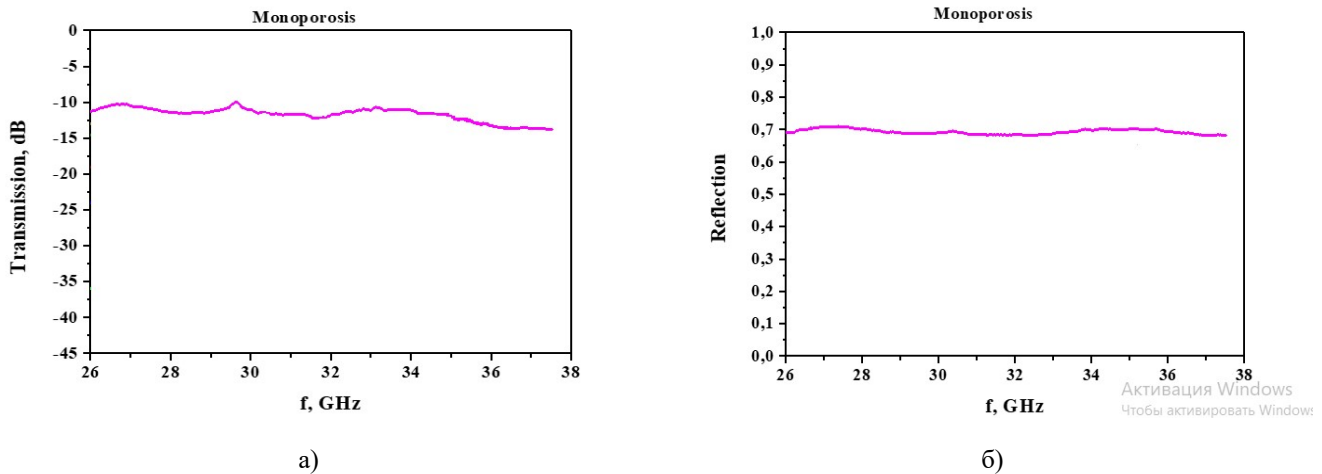


Рис. 5. Спектральні характеристики I шару з 30 % SiC:  
а) коефіцієнт передачі; б) коефіцієнт відбиття

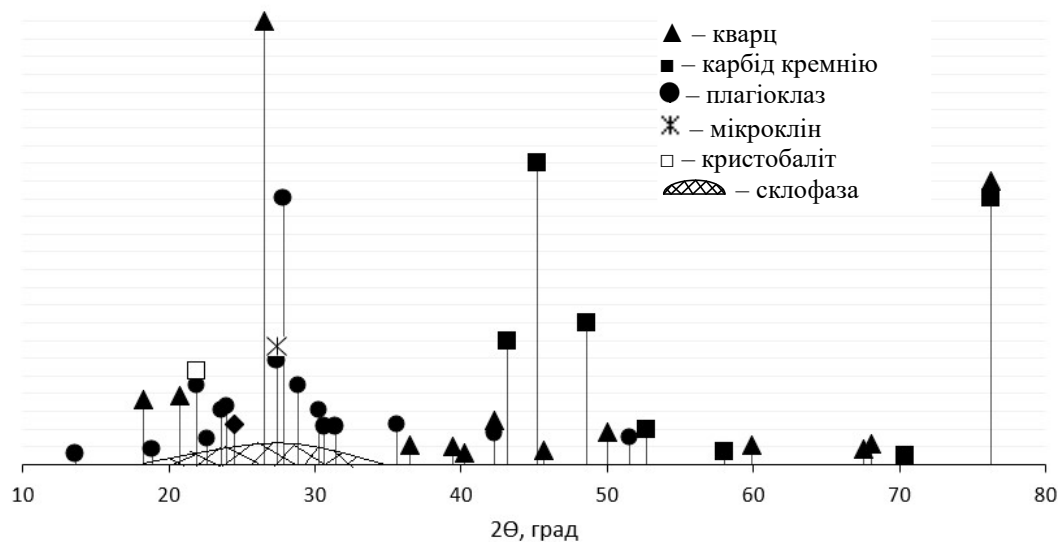


Рис. 6. Штрих-рентгенограма I шару з 30 % SiC після випалу

Як видно на штрих-рентгенограмі після випалу карбід кремнію (SiC) зберігся в складі I шару, що є важливою умовою отримання радіопоглинаючої кераміки за класифікацією-ідентифікацією.

В діапазоні частот 25,8–37,5 ГГц коефіцієнт передачі хвилі знаходиться в межах 10–13 дБ. Коефіцієнт відбиття хвилі становив близько 0,7 дБ. Це вказує на перспективу застосування цього складу з SiC як матеріал для радіопоглинаючої кераміки.

В результаті виконання роботи було розроблено технологію виготовлення радіопоглинаючої композиційної кераміки з полив'яним покриттям, яка за проведеним аналізом має захисні властивості від електромагнітного випромінювання.

Для шару з карбідом кремнію найкращим був зразок з 30 % SiC, який мав наступні властивості: водопоглинання – 5,6 %, відкрита поруватість – 12,2 %, уявна густина – 2,16 г/см<sup>3</sup>.

Для II шару були характерні такі данні: водопоглинання – 6,0 %, відкрита поруватість – 11,8 %, уявна густина – 1,96 г/см<sup>3</sup>.

Виготовлена за розробленою технологією двошарова плитка з полив'яним покриттям мала наступні характеристики: водопоглинання – 9,8 % відкрита поруватість – 18,2 %, уявна густина – 1,90 г/см<sup>3</sup>. Окремо для I шару плитки з 30 % SiC було проведено рентгенофазовий аналіз, що показав наявність SiC, що є важливою умовою отримання радіопоглинаючої кераміки.

Досліджувались також електродинамічні характеристики зразку з 30 % SiC у діапазоні частот 25,8–37,5 ГГц. Коефіцієнт передачі хвилі знаходиться в межах 10–13 дБ. Коефіцієнт відбиття хвилі становив близько 0,7 дБ. Це вказує на перспективу застосування цього складу з SiC як матеріал для радіопоглинаючої кераміки.

### Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку

Основна задача дослідження – розробка технології виготовлення радіопоглинаючої кераміки з полив'яним покриттям, яка має захисні властивості від електромагнітного випромінювання виконана, що підтверджено проведеними випробуваннями та аналізом отриманих результатів.

При проведенні досліджень використовували методи визначення водопоглинання, уявної густини, відкритої поруватості у відповідності з ГОСТ 24409-80. Експериментальні значення показників визначали як середнє арифметичне з 3 вимірювань.

Розроблена кераміка має характеристики, що задовольняють вимогам її використання в будівництві та в електронних приладах з метою ефективного екранування шкідливого випромінювання, а саму кераміку, згідно класифікації, можна віднести до класу радіопоглинаючої кераміки.

Робота виконувалась в рамках гранту Національним фондом досліджень України за договором №166/02/0337 «Композиційні матеріали на основі кераміки для захисту від електромагнітного випромінювання» (реєстраційний номер 0121U111372).

### Список літератури

1. Шевель Д. М. Электромагнитная безопасность : Palmarium academic publishing, 2012. 512 с.
2. Давыдов Б. И., Тихончук В. С., В. В. Антипов Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / под ред. Ю.Г. Григорьева : М. : Энергоатомиздат, 1984. 176 с.
3. Минин Б. А. СВЧ и безопасность человека : Москва : Советское радио, 1974. 352 с.
4. Иванов В. Г., Дзюндзюк Б. В., Олександров Ю. М. Охрана праці в електроустановках : Київ: АТ Око, 1994. 227 с.
5. Капура И.А., Бакуменко Б.В. Анализ методов и средств защиты радиоэлектронной аппара. *Системы обработки информации*. 2010. № 6. С. 87-90.
6. Левитт Б. Блейк Защита от электромагнитных полей : Санкт-Петербург: АСТ, Астрель, 2007. 448 с.
7. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование : Долгопрудный: Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 128 с.
8. Петров В. М., Гагулин В. В. Радиопоглощающие материалы. *Неорганические материалы*. 2001. Т. 37, №2. С. 135-141.
9. Куневич А. В., Подольский А. В., Сидоров И. Н. Ферриты: Энциклопедический справочник. Магниты и магнитные системы. Том 1 : Санкт-Петербург: Лик, 2004. 361 с.
10. Разработка композиционных покрытий по керамике, экранирующих электромагнитные

излучения / Г.В. Лисачук и др. Вестник науки и техники. 2005. – № 4 (23). С. 55–60.

11. Влияние токопроводящих добавок на электрофизические свойства облицовочной керамики / Г. В. Лисачук та ін. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. 2005. № 25. С. 163–166.
12. ASTM Diffraction data cards and alphabetical grouped numerical index of X-ray diffraction data. – Philadelphia, 1977.

### Bibliography (transliterated)

1. Shevel D. M. *Elektromahnytnaia bezopasnost* : Palmarium academic publishing, 2012. 512 p.
2. Davыdov B. Y., Tykhonchuk V. S., V. V. Antypov *Byolohycheskoe deistvye, normyrovanye y zashchyta ot elektromahnytnykh yzluchenyi* / pod red. Yu.H. Hryhoreva : Moskva : Enerhoatomizdat, 1984. 176 p.
3. Mynyn B. A. *SVCh y bezopasnost cheloveka* : Moskva : Sovetskoe radio, 1974. 352 p.
4. Ivanov V. H., Dziundziuk B. V., Oлександрov Yu. M. *Okhorona pratsi v elektroustanovkakh* : Kyiv: AT Oко, 1994. 227 p.
5. Kapura Y.A., Bakumenko B.V. *Analyz metodov y sredstv zashchyty radyoelektronnoi appara. Systemy obrobky informatsii*. 2010. № 6, pp. 87–90.
6. Levyyt B. Bleik *Zashchyta ot elektromahnytnykh polei* : Sankt-Peterburh: AST, Astrel, 2007. 448 s.
7. Shapyro D. N. *Elektromahnytnoe ekраниrovanye : Dolhoprudnyi: Dolhoprudnyi: Yzdatelskyi Dom «Yntellekt»*, 2010. 128 p.
8. Petrov V. M., Nahulyn V. V. *Radyopohloshchayushchye materialy. Neorhanycheskye materyaly*. 2001. Т. 37, №2, pp. 135–141.
9. Kunevych A. V., Podolskyi A. V., Sydorov Y. N. *Ферриты: Энциклопедический справочник. Магниты y mahnytnye systemy. Том 1 : Sankt-Peterburh: Lyk, 2004. 361 p.*
10. *Razrabotka kompozytsyonnykh pokrytyi po keramyke, ekраниruyushchykh elektromahnytnye yzluchenyia* / H.V. Lysachuk y dr. *Vestnyk nauky y tekhnky*. 2005. – № 4 (23), pp. 55–60.
11. *Vlyanye tokoprovodiashchykh dobavok na elektrofyzicheskye svoistva oblytsovochnoi keramyky* / H. V. Lysachuk ta in. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichniy instytut»*. 2005. № 25, pp. 163–166.
12. ASTM Diffraction data cards and alphabetical grouped numerical index of X-ray diffraction data. – Philadelphia, 1977.

Надійшла (received) 19.10.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Лисачук Георгій Вікторович (Лисачук Георгий Викторович, Lisachuk George Viktorovych)** – професор кафедри Технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7157-9115> e-mail: [lisachuk@kpi.kharkov.ua](mailto:lisachuk@kpi.kharkov.ua)

**Кривобок Руслан Вікторович (Кривобок Руслан Викторович, Kryvobok Ruslan Viktorovych)** – старший науковий співробітник Науково-дослідної частини, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2334-4434> e-mail: [krivobok491@gmail.com](mailto:krivobok491@gmail.com)

**Захаров Артем Вячеславович (Захаров Артем Вячеславович, Zakharov Artem Viacheslavovych)** – старший науковий співробітник Науково-дослідної частини, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0120-8263> e-mail: [zakharovartem106@gmail.com](mailto:zakharovartem106@gmail.com)

**Волощук Валентина Василівна (Волощук Валентина Васильевна, Voloshchuk Valentyna Vasylivna)** – аспірант кафедри Технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2120-3088> e-mail: [valenty93vol@gmail.com](mailto:valenty93vol@gmail.com)

**Майстат Микита Сергійович (Майстат Никита Сергеевич, Maistat Mykyta Serhiiovych)** – аспірант кафедри Технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1875-3946> e-mail: [aichemict777@gmail.com](mailto:aichemict777@gmail.com)

**Сарай Василь Володимирович (Сарай Василий Владимирович, Sarai Vasyl Volodymyrovych)** – аспірант кафедри Технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8058-9211> e-mail: [nov\\_vitv@ukr.net](mailto:nov_vitv@ukr.net)

**G. V. LISACHUK, R. V. KRYVOBOK, A. V. ZAKHAROV, V. V. VOLOSHCHUK, M. S. MAISTAT, V. V. SARAI**

#### TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF RADIO ABSORPTION CERAMICS

The object of the work is the technology of manufacturing radio-absorbing ceramics on the basis of facing tiles with the addition of silicon carbide. The method of hydrostatic weighing in water was used to determine the physical properties. X-ray phase analysis and spectral characteristics - transmission and reflection coefficients, in the frequency range 25.8 – 37.5 GHz were also determined. Tiles consist of two layers. First, separately obtain a press powder for the I and II layer of raw materials in a given amount, which were weighed, moistened, ground in a ball mill; the slip was dried in an oven, then ground and passed through a suitable sieve. The moistened press powder for the first layer was weighed and poured into a mold for pressing, after which the moistened press powder for the second layer was weighed and poured into the mold for pressing. The resulting raw material was dried. The semi-finished product was covered with watering and placed in an oven. The finished semi-finished product was fired in a silite furnace. The two-layer tile with an irrigated covering made on the developed technology was characterized by the following characteristics: water absorption – 9,8 %, imaginary density – 1,90 g/cm<sup>3</sup>. The developed ceramics, according to the classification, can be referred to the class of radio-absorbing ceramics.

**Keywords:** radioabsorption, composite ceramics, two-layer tile, silicon carbide, water absorption, open porosity, apparent density, X-ray phase analysis, transmission coefficient, reflection coefficient

**Г. В. ЛИСАЧУК, Р. В. КРИВОБОК, А. В. ЗАХАРОВ, В. В. ВОЛОЩУК, Н. С. МАЙСТАТ, В. В. САРАЙ**

#### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОПОГЛАШАЮЩЕЙ КЕРАМИКИ

Объектом работы является технология изготовления радиопоглощающей керамики на основе облицовочной плитки с добавлением карбида кремния. Для определения физических свойств использовался метод гидростатического взвешивания в воде. Определяли также рентгенофазовый анализ и спектральные характеристики – коэффициенты передачи и отражения в диапазоне частот 25,8 – 37,5 ГГц. Плитка состоит из двух слоев. Сначала отдельно получают пресс-порошок для I и II слоя из сырьевых материалов в заданном количестве, которые взвешивали, увлажняли, мололи в шаровой мельнице; шликер высушивали в сушильном шкафу затем измельчали и пропускали через соответствующее сито. Увлажненный пресс-порошок для I слоя, отвешивали и засыпали в форму для прессования, после чего увлажненный пресс-порошок для II слоя, отвешивали и досыпали в форму для прессования. Полученный сырец высушивали. Полуфабрикат покрывали глазурью и ставили в сушильный шкаф. Готовый полуфабрикат обжигали в силитовой печи. Изготовленная по разработанной технологии двухслойная плитка с глазурованным покрытием характеризовалась следующими характеристиками: водопоглощение – 9,8%, мнимая плотность – 1,90 г/см<sup>3</sup>. Разработанную керамику, согласно классификации, можно отнести к классу радиопоглощающей керамики.

**Ключевые слова:** радиопоглощение, композиционная керамика, двухслойная плитка, карбид кремния, водопоглощение, открытая пористость, мнимая плотность, рентгенофазовый анализ, коэффициент передачи, коэффициент отражения