

УДК 666.651

doi:10.20998/2413-4295.2023.02.09

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА РАДІОПРОЗОРИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Г. В. ЛІСАЧУК, Р. В. КРИВОБОК, В. В. ВОЛОЩУК\*

Кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: valenty93vol@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Керамічні радіопрозорі матеріали – це неметалічні матеріали, які забезпечують проходження електромагнітного випромінювання у діапазоні радіочастот  $10^5$ – $10^{12}$  Гц з мінімальним діелектричними втратами в діапазоні робочих температур ( $\operatorname{tg}\delta 10^{-2}$ – $10^{-5}$ ,  $\varepsilon < 10$ ) і низьким значенням коефіцієнта відбиття радіохвиль ( $P < 1\%$ ). Керамічні радіопрозорі матеріали використовують для створення обтічників ракет і літальних апаратів, які захищають антенні системи від зовнішніх факторів. Для синтезу радіопрозорих керамічних матеріалів доцільно та перспективно використовувати такі кристалічні фази, як цельзіан ( $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) та славсоніт ( $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), завдяки їх низьким показникам діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат і досить високим показникам термічної стійкості та температури плавлення, порівняно з іншими алюмосилікатними сполуками (муліт, сподумен, кордієрит тощо). Розробка технології отримання радіопрозорих керамічних антенних обтічників та елементів захисних конструкцій антенних систем авіаційних об'єктів на основі системи  $\text{BaO}$  ( $\text{SrO}$ ) –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{SiO}_2$  є актуальною. Для формування складнопрофільних керамічних радіопрозорих матеріалів використовували шлікерне лиття у пористі гіпсові форми. Для порівняння розроблених керамічних складів досліджували фізико-механічні, діелектричні та електродинамічні властивості за нормальних умов та у міліметровому частотному діапазоні (26-38 ГГц). У результаті проведених досліджень розроблено: технологію виробництва керамічних радіопрозорих матеріалів на основі славсоніту методом напіссухого пресування, на основі цельзіан-славсоніту методом шлікерного лиття та на основі цельзіану або славсоніту методом шлікерного лиття. Встановлено, що розроблені матеріали відповідають технічним вимогам, що висувають до радіопрозорих керамічних матеріалів, і можуть використовуватися для виробництва елементів захисних конструкцій антенного обладнання, таких як носові обтічники для авіаційних об'єктів.

**Ключові слова:** керамічні радіопрозорі матеріали; цельзіан; славсоніт; напіссухе пресування, шлікерне лиття; носові обтічники

## PRODUCTION TECHNOLOGY OF RADIO-TRANSPARENT CERAMIC MATERIALS

G. LISACHUK, R. KRYVOBOK, V. VOLOSHCHUK\*

Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Ceramic radiotransparent materials are non-metallic materials that ensure the transmission of electromagnetic radiation in the radio frequency range of  $10^5$ – $10^{12}$  Hz with minimal dielectric losses in the operating temperature range ( $\operatorname{tg}\delta 10^{-2}$ – $10^{-5}$ ,  $\varepsilon < 10$ ) and a low value of the radio wave reflection coefficient ( $P < 1\%$ ). Ceramic radiotransparent materials are used to create rocket and aircraft fairings that protect antenna systems from external factors. For the synthesis of radiotransparent ceramic materials, it is expedient and promising to use such crystalline phases as celsian ( $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) and slawsonite ( $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) due to their low dielectric constant and dielectric loss tangent, as well as rather high thermal stability and melting point compared to other aluminosilicate compounds (mullite, spodumene, cordierite, etc.). The development of technology for obtaining radio-transparent ceramic antenna fairings and elements of protective structures of antenna systems of aviation facilities based on the  $\text{BaO}$  ( $\text{SrO}$ ) –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{SiO}_2$  system is relevant. For the formation of complex profile ceramic radiotransparent materials slurry casting in porous gypsum molds is used. In order to compare the developed ceramic compositions, the physico-mechanical, dielectric and electrodynamic properties were studied under normal conditions and in the millimeter frequency range (26-38 GHz). As a result of the research, the following have been developed: a technology for the production of ceramic radiotransparent materials based on slawsonite by semi-dry pressing method, based on celsian-slawnite by slip casting method and based on celsian or slawnite by slip casting method. It has been established that the developed materials meet the technical requirements for radio-transparent ceramic materials and can be used to produce elements of protective structures of antenna equipment, such as nose fairings for aircraft.

**Keywords:** ceramic radiotransparent materials; celsian; slawsonite; semi-dry pressing; slip casting; nose fairings

### Вступ

Керамічні радіопрозорі матеріали (КРМ) – це неметалічні матеріали, які забезпечують проходження електромагнітного випромінювання у діапазоні радіочастот  $10^5$ – $10^{12}$  Гц з мінімальним діелектричними втратами ( $\operatorname{tg}\delta 10^{-2}$ – $10^{-5}$ ,  $\varepsilon < 10$ ) в діапазоні робочих температур та низькими показниками коефіцієнта відбиття радіохвиль ( $P < 1\%$ ). Також вони повинні відповідати вимогам, що

висуваються до матеріалів, відповідно до аеродинамічних, теплових та ерозійних навантажень. КРМ використовують для створення обтічників ракет і літальних апаратів, які захищають антенні системи від зовнішніх факторів.

До таких матеріалів пред'являють наступні вимоги [1-4]: низькі значення показників діелектричних властивостей (діелектрична проникність  $< 10$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta \leq 0,01$ ); робочий температурний діапазон  $-60 \div$

+1500 °C за умови тривалості дії при максимальній робочій температурі не менше 5 хв; межа міцності при згинанні  $\geq 150$  МПа; температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР)  $\leq 5,0 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>; теплопровідність матеріалу  $\lambda \leq 3,0$  Вт/(м·°C); водопоглинання  $\leq 1$  %; прозорість в радіочастотному діапазоні (коефіцієнт відбиття радіохвиль  $\leq 1$  %); стабільність фізико-механічних та електродинамічних характеристик за умови високих температур в широкому частотному діапазоні.

Перспективним напрямком створення радіопрозорих матеріалів є використання неорганічних матеріалів [4-9], таких як технічна кераміка, склокерамічні матеріали та композиційна кераміка, які мають такі переваги: високі експлуатаційні характеристики, фізичні та механічні властивості, довговічність матеріалів. Під час розробки даних матеріалів необхідно враховувати особливості тих матеріалів, які використовують в якості керамічної матриці.

Сьогодні велика кількість досліджень спрямована на створення КРМ, але більшість з них не відповідає вимогам щодо термостійкості, стійкості до окиснення в потоках газів, наслідком чого є деградація цих матеріалів і нестабільність їх діелектричних характеристик в робочому діапазоні температур.

Для синтезу радіопрозорих керамічних матеріалів доцільно та перспективно використовувати такі кристалічні фази, як цельзіан ( $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) та славсоніт ( $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), завдяки їх низьким показникам діелектричної проникності і тангенсу кута діелектричних втрат, а також досить високим показникам термічної стійкості та температури плавлення, порівняно з іншими алюмосилікатними сполуками (муліт, сподумен, кордієрит тощо [9-11]).

#### Мета роботи

Розробка технології отримання керамічних радіопрозорих матеріалів для виготовлення антенних обтічників та елементів захисних конструкцій антенних систем авіаційних об'єктів на основі системи  $\text{BaO}$  ( $\text{SrO}$ ) –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{SiO}_2$ .

#### Виклад основного матеріалу

##### Отримання КРМ на основі славсоніту методом напівсухого пресування

Для виготовлення керамічних виробів простої форми з непластичних мас зазвичай використовують метод напівсухого пресування для отримання щільноспеченого матеріалу.

В попередніх дослідженнях [12] встановлено, що для інтенсифікації синтезу славсоніту найкращими добавками є оксиди літію та стануму, а також комплексних інтенсифікаторів  $\text{LiF}$  :  $\text{NaF}$  та  $\text{Li}_2\text{O}$  :  $\text{SnO}$ .

Технологія виготовлення КРМ на основі славсоніту методом напівсухого пресування є двостадійною та складається з наступних етапів:

- синтез кристалічної фази славсоніт;
- випал керамічних виробів на основі славсонітової кераміки із заданими властивостями.

Для встановлення технологічних параметрів виготовлення КРМ було застосовано повний факторний експеримент типу  $2^3$  (рис. 1). Змінними факторами виступали: температура випалу кераміки, час помелу синтезованого матеріалу, тиск пресування.

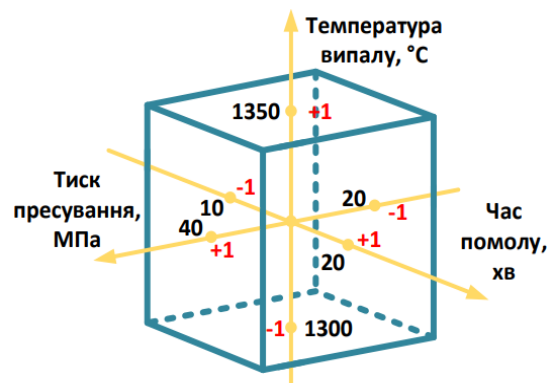


Рис. 1 – План експерименту типу  $2^3$

Дослідні зразки отримано помелом сировинних матеріалів в планетарному млині (залишок на ситі № 0063 не більше 1,5 %), потім змішуванням зі зв'язуючим (вологість 8 %). Формування зразків проводили у дві стадії: формування брикетів з наступним «протиранням» крізь сито № 05; пресування, потім сушка та випал за температури 1300 та 1350 °C з витримкою одна година.

Відповідно до отриманих результатів досліджень встановлено залежності: «час помелу – тиск пресування – температура випалу – водопоглинання», «час помелу – тиск пресування – температура випалу – діелектрична проникність», «час помелу – тиск пресування – температура випалу – міцність на згин».

Встановлено, що збільшення часу помелу продуктів синтезу, тиску пресування та температури випалу приводить до водопоглинання, підвищення міцності при згині, зберігаючи при цьому значення діелектричної проникності в межах 6,25–6,9.

Відповідно до проведеного комплексу досліджень розроблено технологічну схему отримання керамічних виробів простої форми на основі славсоніту методом напівсухого пресування (рис. 2), з наступними технологічними параметрами: випал на стадії синтезу славсоніту за температури 1250 °C (витримка 1 година); помел в планетарному млині впродовж 20 хв. (розмір часток не більше 0,15 мм); зволоження карбоксиметилцелюлозним розчином до вологості 8 %; формування виробів пресуванням (тиск 40 МПа); випал за температури 1350 °C (витримка 1 година).



Рис. 2 – Технологічна схема виробництва КРМ на основі славсоніту

Результати дослідження фізико-механічних та діелектричних властивостей розроблених складів КРМ-1 (з додаванням – 1 мас. %  $\text{Li}_2\text{O}$  :  $\text{SnO}_2$ ) та КРМ-2 (з додаванням – 1 мас. %  $\text{Li}_2\text{O}$ ) кераміки наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Властивості КРМ на основі славсоніту

Властивості	КРМ-1	КРМ-2	Вимоги до КРМ
Уявна щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$	2960	2880	Не менше 2500
Водопоглинання, %	0,08	0,13	Менше 0,1
Діелектрична проникність 1 кГц	6,42	6,07	Менше 10
Тангенс кута діелектричних втрат при 1 кГц	0,017	0,012	$10^{-4} - 10^{-2}$
Питомий об'ємний опір, $\text{Ом}\cdot\text{см}$	$5,9 \cdot 10^{14}$	$5,9 \cdot 10^{14}$	–
Міцність при вигині, МПа	72,3	62,4	60,0
Температура експлуатації, °С	1500	1300	1200

Бачимо, що за своїми властивостями розроблена кераміка задовольняє вимогам, що висуваються до радіопрозорих матеріалів.

#### Отримання КРМ на основі цельзіан-славсоніту методом шлікерного лиття

Для формування великогабаритних КРМ, наприклад, обтічників авіаційних об'єктів [13], використовують переважно шлікерне лиття у пористі гіпсові форми.

Попередньо встановлено [14], що для отримання керамічних виробів складної форми на основі барійстронцієвого анортиту  $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  та для

виключення великої усадки готових виробів доцільно використовувати двостадійну керамічну технологію з формуванням заготовок методом шлікерного лиття.

Для оптимізації технологічних параметрів використовували факторний експеримент типу  $2^3$  та досліджували вплив часу помелу синтезованого барійстронцієвого анортиту (протягом 10–30 хв.), кількості реологічної добавки для шлікера (0,01–0,1 мас. %) та температури випалу виробів (1250–1350 °С) на водопоглинання, щільність, межу міцності при згині керамічних матеріалів. Отримано рівняння третього порядку, які описують залежності: «кількість добавки – час помелу – температура випалу – водопоглинання», «кількість добавки – час помелу – температура випалу – уявна щільність» та «кількість добавки – час помелу – температура випалу – межа міцності на згин», які дозволяють достатньо точно спрогнозувати експлуатаційні характеристики КРМ на основі цельзіан-славсоніту. Зразки з кращими властивостями мали наступні значення: водопоглинання – 0,07 %, уявна щільність –  $3,06 \text{ г}/\text{см}^3$ , межа міцності при згині – 72,50 МПа.

За результатами проведених досліджень розроблено технологічну схему виробництва носових обтічників на основі цельзіан-славсонітової кераміки (рис. 3). Формування заготовок обтічників проводили методом шлікерного лиття в заготовлених гіпсових формах з металічною серцевиною. Висушували заготовки у сушильній шафі за температури 110 °С до остаточної вологи менше 1 %. Випал керамічних виробів відбувався у муфельній печі за температури 1350 °С з ізотермічною витримкою 2 години. Після чого проводили їх механічну обробку та раціоналізування готових виробів.

Дослідження електродинамічних та діелектричних властивостей у НВЧ діапазоні показало, що отримані КРМ характеризуються низькою діелектричною проникністю – 4,5 – 4,7, тангенсом кута діелектричних втрат – 0,006 – 0,0078, коефіцієнтом відбиття радіохвиль – від -2 до -6,5 дБ, коефіцієнтом передачі радіохвиль – від -2 до -6,1 дБ та задовольняють вимоги, що висуваються до сучасних керамічних радіопрозорих матеріалів для авіаційних об'єктів.

#### Отримання КРМ на основі цельзіану або славсоніту методом шлікерного лиття

У роботі [16] встановлено, що в результаті отримання керамічних радіопрозорих матеріалів на основі стехіометричних сполук цельзіану або славсоніту за одностадійною технологією досягаються необхідні рівні діелектричних властивостей (діелектрична проникність 7,1–9,8), але матеріали характеризуються не задовільними показниками фізико-механічних властивостей (водопоглинання 21–26 %, уявна щільність  $1,6\text{--}2,0 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Саме тому наступні дослідження направлені на удосконалення технології виготовлення КРМ на основі цельзіану або славсоніту методом лиття для отримання елементів захисних конструкцій радіотехнічних систем авіаційних об'єктів або установок наземного керування.

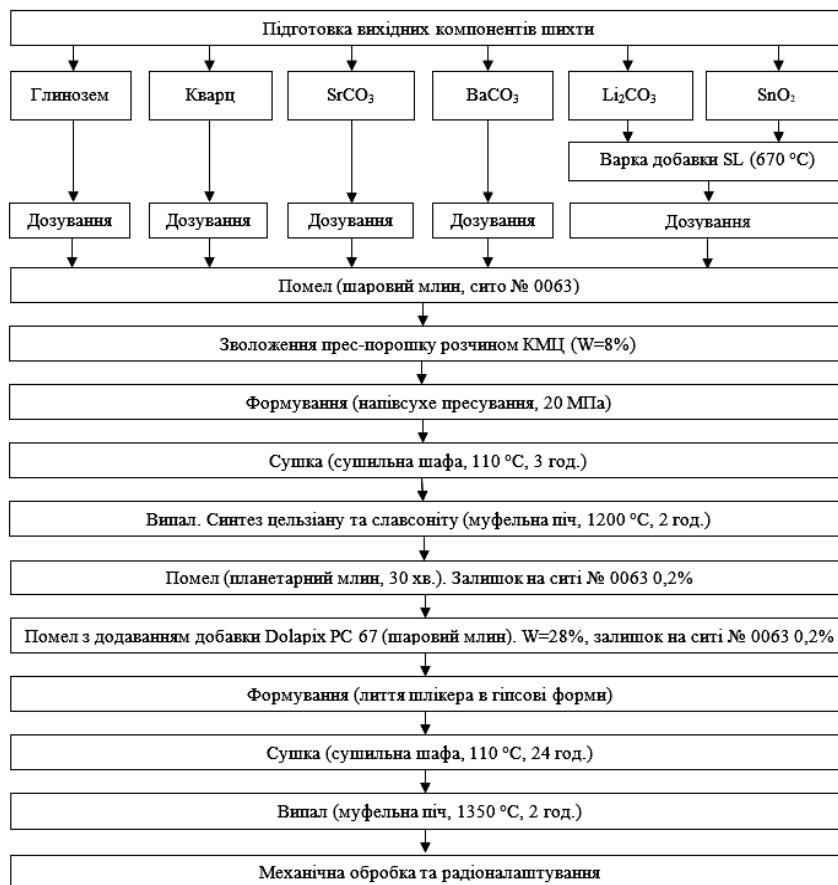


Рис. 3 – Технологічна схема виробництва КРМ на основі целезіан-славсоніту методом лиття [15]

Виготовлення зразків проводили за двостадійною технологією, використовуючи інтенсифікуючі добавки [17], для отримання щільноспеченого керамічного матеріалу з заданими властивостями.

Перша стадія – синтез цільової фази. Сировинні матеріали – кварц молотий, карбонат стронцію або карбонат барію та технічний глинозем, змішували у стехіометричному співвідношенні. До маси додавали евтектичну композицію LS для зниження температури синтезу в кількості 1 мас. % понад 100 мас. %. Водний 10 %-ий розчин карбоксиметилцелюлози використовували для зволоження маси. Брикети для синтезу формували методом напівсухого пресування на ручному гідравлічному пресі. Отримані брикети випалювали за температури 1200–1250 °C (витримка 2 години).

Синтезовані брикети подрібнювали до фракції не більше 3 мм та виготовляли шлікер вологістю 25–27 % з додаванням Dolarix PC 67.

Формування виробів, а саме носових обтічників, проводили методом лиття у гіпсові форми з металевою серцевиною. По досягненню необхідної міцності черепка, сирець відділяли від форми та просушували до остаточної вологості не більше 1 %. Після чого проводили випал сирецю у муфельній печі за температури 1350 °C (витримка 4 години). Потім виріб шліфували (рис. 4) та проводили радіоналаштування готового обтічника.



Рис. 4 – Керамічний носовий обтічник після механічної обробки

Технологічну схему отримання носових обтічників на основі целезіану або славсоніту за двостадійною технологією можна представити наступним чином на рис. 5.

Результати дослідження властивостей носових обтічників, отриманих на основі розроблених складів славсонітової та целезіанової керамік, наведено в табл. 2.

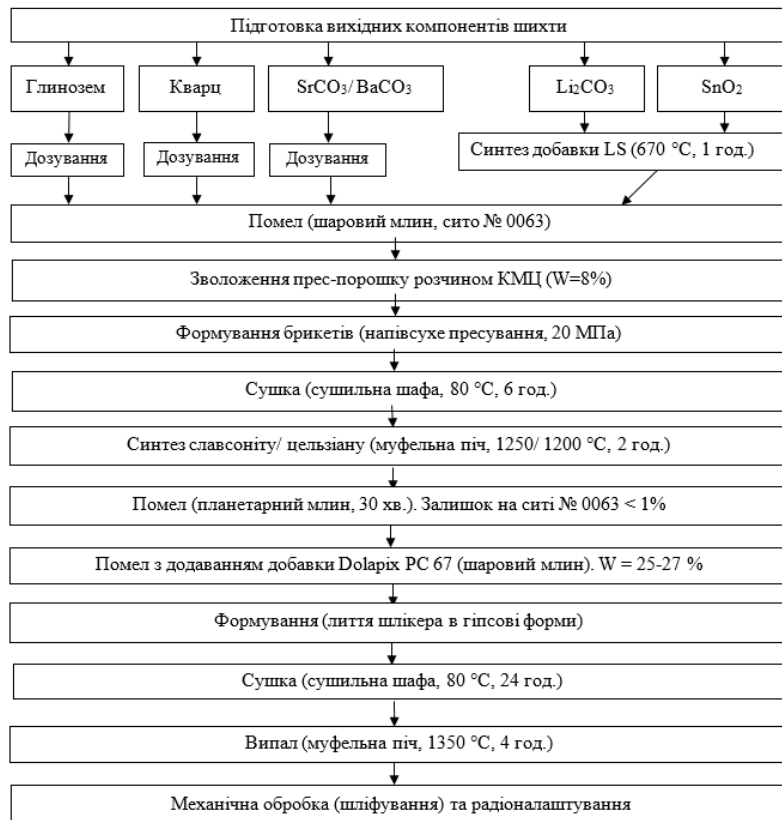


Рис. 5 – Технологічна схема отримання носових обтічників на основі целезіану або славсоніту

Таблиця 2 – Властивості досліджених керамічних носових обтічників

Властивості	RTC-S славсонітова	RTC-C цельзіанова
Водопоглинання $W$ , %	0,7	1,3
Уявна щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,8	2,7
Відкрита пористість $\Pi$ , %	1,6	2,2
Межа міцності при згині $\sigma_{zg}$ , МПа	368	276
Діелектрична проникність при 1 кГц, $\epsilon$	6,5	6,8

Експериментально визначено, що електродинамічні та діелектричні характеристики носових обтічників на основі славсоніту або целезіану в мікрохвильовому діапазоні 26–38 ГГц задовольняють основним вимогам, що висуваються до радіопрозорих матеріалів та мають наступні показники:  $k_{пер} = -5,5 - -2,0$  дБ;  $k_{відб} = -1,8 - -6,1$  дБ;  $\epsilon = 4,5-5,3$ ;  $tg\delta = 0,008-0,015$ .

### Висновки

За результатами проведених досліджень розроблено технологічні параметри отримання виробів простої форми методом напівсухого пресування на основі славсоніту, а також отримання

виробів складної конфігурації на основі систем ВаО (SrO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> методом шлікерного лиття.

Досліджено фізико-механічні та діелектричні властивості носових обтічників, отриманих за розробленими оптимальними технологічними параметрами, за нормальних умов та в міліметровому частотному діапазоні 26–38 ГГц. Отримані носові обтічники характеризувалися наступними показниками:  $k_{пер} = -5,5 - -2,0$  дБ;  $k_{відб} = -1,8 - -6,1$  дБ;  $\epsilon = 4,5-5,3$ ;  $tg\delta = 0,008-0,015$ .

Встановлено, що відповідно до технічних вимогам, які висуваються до керамічних радіопрозорих матеріалів, розроблені види кераміки є радіопрозорими, і можуть використовуватися для виготовлення окремих деталей та елементів захисних конструкцій антенного обладнання в авіаційній та космічній галузях, а також в радіоелектроніці.

### Список літератури

1. Zaichuk A. V., Amelina A. A., Karasik Y. V., Khomenko Y. S., Lementareva V. A., Saltykov D. Yu. Radio-transparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition *Functional Materials*. 2019. Vol. 26, No. 1. P. 174-181. doi:10.15407/fm26.01.174.
2. Suzdal'tsev E. I., Rozhkova T. I. Materials with Controlled Dielectric Constants Based on a Glass Ceramic of Lithium Alumina-Silicate Composition. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003. Vol. 44. P. 260-262. doi:10.1023/A:1027343818027.

3. Narang S. B., Shalini B. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: a review. *Journal of Ceramic Processing Research*. 2010. Vol. 11, No. 3. P. 316-321.
4. Zaichuk O., Amelina A., Hordieiev Yu., Kalishenko Y., Sribniak N., Halushka S., Borodai D., Borodai A. Patterns in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium-anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 6, No. 6 (108). P. 15-26. doi: 10.15587/1729-4061.2020.216754.
5. Sebastian M. T., Ubc R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *International Materials Reviews*. 2015. Vol. 60, No 7. P. 392-412. doi:10.1179/1743280415Y.0000000007.
6. Zaichuk A., Amelina A., Kalishenko Yu., Hordieiev Yu., Rudnieva L. Ultra-high frequency radio-transparent ceramics of celsian composition based on BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> glass: microstructure, physical and technical properties. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2022. Vol. 57, No. 6. P. 1183-1194.
7. Khomenko E. S., Zaichuk A. V., Karasik E. V., Kunitsa A. A. Quartz ceramics modified by nanodispersed silica additive. *Functional Materials*. 2018. Vol. 25, No. 3. P. 613-618. doi:10.15407/fm25.03.613.
8. Khomenko E. S., Zaichuk A. V., Karasik E. V., Ivchenko V. D., Sribniak N. M., Datsenko B. M. Improvement of strength characteristics of quartz ceramics. *Functional Materials*. 2020. Vol. 27, No. 2. P. 264-269. doi:10.15407/fm27.02.264.
9. Suzdal'tsev E. I. Radio Transparent, Heat-Resistant Materials for the 21st Century. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2002. Vol. 43, No. 3/4. P. 103-110. doi:10.1023/a:1019603111549.
10. Гнесин Г. Г. *Радиопрозрачные материалы* : в 2 т. Киев : Наукова думка, 2008. Т. 2. Неорганическое материаловедение. С. 204-210.
11. Zaichuk A. V., Amelina A. A., Khomenko Y. S., Baskevich A. S., Kalishenko Y. R. Heat-resistant ceramics of β-eucryptite composition: peculiarities of production, microstructure and properties. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2020. No. 2. P. 52-59. doi: 10.32434/0321-4095-2020-129-2-52-59.
12. Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A., Tsovma V., Lapuzina O. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. No. 1 (6). P. 10-15. doi: 10.15587/1729-4061.2017.91110.
13. *Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания* : учеб. пособие / А. Г. Ромашин и др. Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. 239 с.
14. Пітак Я. М., Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Захаров А. В., Волощук В. В., Чефранов Є. В., Майстат М. С. Дослідження впливу технологічних параметрів на властивості цельзіан-славсонітової кераміки. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2019. № 119. С. 82-88. doi: 10.35857/2663-3566.119.08.
15. *Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони: колективна монографія / за заг. ред. Марченка А.П.* Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2021. С. 95-128.
16. Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Волощук В. В. Вивчення технологічних параметрів отримання цельзіанової та славсонітової кераміки за одностадійною технологією. *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. 2022. № 2 (1364). С. 3-5. doi:10.20998/2220-4784.2022.02.01.
17. Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Волощук В. В. Інтенсифікація процесу спікання керамічних матеріалів на основі системи ВаО – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>. *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. 2022. № 1 (1363). С. 3-8. doi: 10.20998/2220-4784.2022.01.01.

## References (transliterated)

1. Zaichuk A. V., Amelina A. A., Karasik Y. V., Khomenko Y. S., Lementareva V. A., Saltykov D. Yu. Radio-transparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition *Functional Materials*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 174-181, doi:10.15407/fm26.01.174.
2. Suzdal'tsev E. I., Rozhkova T. I. Materials with Controlled Dielectric Constants Based on a Glass Ceramic of Lithium Alumina-Silicate Composition. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2003, vol. 44, pp. 260-262, doi:10.1023/A:1027343818027.
3. Narang S. B., Shalini B. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: a review. *Journal of Ceramic Processing Research*, 2010, vol. 11, no. 3, pp. 316-321.
4. Zaichuk O., Amelina A., Hordieiev Yu., Kalishenko Y., Sribniak N., Halushka S., Borodai D., Borodai A. Patterns in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium-anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 6, No. 6 (108), pp. 15-26, doi: 10.15587/1729-4061.2020.216754.
5. Sebastian M. T., Ubc R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *International Materials Reviews*, 2015, vol. 60, no 7, pp 392-412, doi:10.1179/1743280415Y.0000000007.
6. Zaichuk A., Amelina A., Kalishenko Yu., Hordieiev Yu., Rudnieva L. Ultra-high frequency radio-transparent ceramics of celsian composition based on BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> glass: microstructure, physical and technical properties. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2022, vol. 57, no. 6, pp. 1183-1194.
7. Khomenko E. S., Zaichuk A. V., Karasik E. V., Kunitsa A. A. Quartz ceramics modified by nanodispersed silica additive. *Functional Materials*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 613-618, doi:10.15407/fm25.03.613.
8. Khomenko E. S., Zaichuk A. V., Karasik E. V., Ivchenko V. D., Sribniak N. M., Datsenko B. M. Improvement of strength characteristics of quartz ceramics. *Functional Materials*, 2020. Vol. 27, no. 2, pp. 264-269, doi:10.15407/fm27.02.264.
9. Suzdal'tsev E. I. Radio Transparent, Heat-Resistant Materials for the 21st Century. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2002, vol. 43, no. 3/4, pp. 103-110, doi:10.1023/a:1019603111549.
10. Gnesin G. G. *Radioprozrachnyie materialy* [Radio transparent materials]: v 2 t, Kiev. Naukova dumka, 2008, T. 2. Neorganicheskoe materialovedenie, pp. 204-210.
11. Zaichuk A. V., Amelina A. A., Khomenko Y. S., Baskevich A. S., Kalishenko Y. R. Heat-resistant ceramics of β-eucryptite composition: peculiarities of production, microstructure and properties. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2020, No. 2, pp. 52-59, doi: 10.32434/0321-4095-2020-129-2-52-59.

12. Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A., Tsovma V., Lapuzinaet O. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in  $\text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. 1 (6), pp. 10-15, doi: 10.15587/1729-4061.2017.91110.
13. *Radioprozrachnyie obtekateli letatelnykh apparatov. Proektirovaniye, konstruksionnyie materialy, tehnologiya proizvodstva, ispytaniya* [Radiotransparent fairings for aircraft. Design, construction materials, production technology, testing] : *ucheb. posobie* / A. G. Romashin i dr., Harkov. Nats. aerokosm. un-t «HAI», 2003, 239 p.
14. Pitak Ya. M., Lisachuk G. V., Kryvobok R. V., Zaxarov A. V., Voloshchuk V. V., Chefranov Ye. V., Majstat M. S. Doslidzhennya vplyvu tehnologichnykh parametriv na vlasty vosti cel'zian-slavsonitovoyi keramiky [Study of the influence of technological parameters on the properties of Celsian-Slavsonite ceramics]. *Naukovi doslidzhennya z vognetryviv ta texnichnoyi keramiky*, 2019, no. 119, pp. 82-88, doi: 10.35857/2663-3566.119.08.
15. *Naukovo-tehnichni pidkhody do vyrishennia aktualnykh problem rozbudovy sektoru bezpeky i oborony* [Scientific and technical approaches to solving the current problems of the development of the security and defense sector]. *kolektyvna monohrafiia* / za zah. red. Marchenka A.P. Odesa. Vydavnychiy dim «Helvetyka», 2021. pp. 95-128.
16. Lisachuk G. V., Kryvobok R. V., Voloshchuk V. V. Vyvchennya tehnologichnykh parametriv otrymannya cel'zianovoyi ta slavsonitovoyi keramiky za odnostadijnoyu tehnologiyeyu [Study of the technological parameters of obtaining Celsian and Slavsonite ceramics by one-stage technology]. *Visnyk Nacional'nogo Texnichnogo Universytetu «XPI». Seriya : Innovacijni doslidzhennya u naukovykh robotax studentiv*, 2022, no. 2 (1364), pp. 3-5, doi:10.20998/2220-4784.2022.02.01.
17. Lisachuk G. V., Kryvobok R. V., Voloshchuk V. V. Intensyfikatsiia protsesu spikannia keramichnykh materialiv na osnovi systemy  $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  [Intensification of the sintering process of ceramic materials based on the  $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  system]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnogo Universytetu «KhPI». Seriya: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv*, 2022, no. 1 (1363), pp. 3-8, doi: 10.20998/2220-4784.2022.01.01.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лісачук Георгій Вікторович** – доктор технічних наук, 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).

**George Lisachuk** – Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7157-9115>; e-mail: [lisachuk@kpi.kharkov.ua](mailto:lisachuk@kpi.kharkov.ua).

**Кривобок Руслан Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: [krivobok491@gmail.com](mailto:krivobok491@gmail.com).

**Ruslan Kryvobok** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor of the Department of Technology of Ceramics, Refractories, Glass and Enamels, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: [krivobok491@gmail.com](mailto:krivobok491@gmail.com).

**Волощук Валентина Василівна** – молодший науковий співробітник 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).

**Valentyna Voloshchuk** – Junior Researcher, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2120-3088>; e-mail: [valenty93vol@gmail.com](mailto:valenty93vol@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Волощук В. В. Технологія виробництва радіопрозорих керамічних матеріалів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 2 (16). С. 63-69. doi:10.20998/2413-4295.2023.02.09.

*Please cite this article as:*

Lisachuk G., Kryvobok R., Voloshchuk V. Production technology of radio-transparent ceramic materials. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 2(16), pp. 63–69, doi:10.20998/2413-4295.2023.02.09.

Надійшла (received) 03.04.2023  
Прийнята (accepted) 05.05.2023