УДК 666.651

О.Ю. Федоренко, Р.В. Кривобок, В.В. Волощук, Я.М. Пітак, О.Р. Тимченко

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ РАДІОПРОЗОРИХ ВІКОН ДЛЯ АНТЕННО–ХВИЛЬОВІДНИХ СИСТЕМ РАКЕТНОЇ ТЕХНІКИ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

Основними умовами ефективного керування високошвидкісними літальними апаратами є надійне передавання сигналів зв'язку, яке більшою мірою залежить від матеріалу захисних елементів антенного обладнання, в тому числі радіопрозорих вікон антенно-хвильовідних систем і надвисокочастотних трактів, що їх обслуговують. У зв'язку із жорсткими умовами експлуатації високошвидкісних ракет існує необхідність використання високотемпературних керамічних радіопрозорих матеріалів для виготовлення зовнішніх захисних елементів, здатних забезпечити надійну роботу радіокерованої техніки. Нами розроблена лінійка радіопрозорих керамік, отриманих за оптимальних технологічних параметрів, відрізняється поліпшеними діелектричними характеристиками (діелектрична проникність 4,56–6,8), підвищеною міцністю (межа міцності при згині 172–368 МПа), та термостійкістю (до 225^{0}С для славсоніт–віллемітової кераміки). За комплексом функціональних та експлуатаційних властивостей всі розроблені керамічні матеріали задовольняють вимоги до радіопрозорих матеріалів та можуть використовуватись в авіаракетній промисловості для виготовлення захисних елементів антенного обладнання в літальних апаратах, що експлуатуються в жорстких умовах служби.

Ключові слова: радіопрозорі вікна, антенно-хвильовідні системи, НВЧ-тракти, ракетна техніка, моно- і гетерофазна кераміка, структуро- і фазоутворення, технологічні параметри, технічні характеристики.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-163-6-149-158

Вступ

Сучасні радіокеровані ракети характеризуються поліпшеними тактико-технічними характеристиками: високою швидкістю, маневреністю та дальністю ураження цілей. Як відомо, при польотах на гіперзвукових швидкостях понад 5 Махів (від 5000 до 25000 км/год), температура на поверхні крилатих ракет перевищує 1000^{0}С, що спричиняє різке погіршення електродинамічних характеристик радіопрозорих матеріалів з яких виготовлені зовнішні захисні елементи антенного обладнання. Це негативно позначається на надійності керування ракетною технікою та точності ураження цілей [1]. Крім того, під час польоту гіперзвукових ракет можуть відбуватись різкі зміни траєкторії їх руху із боковим прискоренням понад 980 м/с^2, що може викликати збільшення напружень, здатних зруйнувати зовнішні захисні конструкції. Окрім екстремальних температур і силових навантажень захисні елементи антенних систем радіокерування зазнають термічних ударів через виникнення екстремальних температурних градієнтів, створених тепловими потоками під час польоту, та підда-

© О.Ю. Федоренко, Р.В. Кривобок, В.В. Волощук, Я.М. Пітак, О.Р. Тимченко, 2025

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ються ерозійному впливу газо-пилових потоків, які також можуть призвести до їх пошкодження. Отже, науково-технічний прогрес в галузі радіокерованої ракетної техніки в значній мірі визначається створенням радіопрозорих матеріалів (РПМ), здатних забезпечити надійний захист і безвідмовну роботу радіоелектронного обладнання в жорстких умовах експлуатації.

Для забезпечення безвідмовної роботи радіоелектронного обладнання радіокерованих ракет в жорстких умовах експлуатації необхідним є виконання таких умов:

– збереження діелектричної стабільності матеріалу радіопрозорих вікон на рівні (ε=3–7 і tg$\delta \leq 10^{-2}$);

– стійкість до аеродинамічних навантажень завдяки збереженню високій міцності матеріалу в умовах підвищених температур ($\sigma_{зг} \geq 35$ МПа);

– забезпечення високої стійкості до різких температурних коливань та високотемпературної абляції під дією ерозійних і корозійних впливів високошвидкісних газових потоків.

Жорсткі вимоги щодо радіопрозорості захисних елементів зовнішніх систем радіокерування в робочому інтервалі частот і температур виключають можливість використання металів для їх виготовлення. В свою чергу екстремальні умови, що створюються на поверхні радіокерованих ракет під час високошвидкісних польотів та маневрування, унеможливлюють застосування полімерів на основі ПВХ для виготовлення захисних елементів, які наразі використовуються для виготовлення радіопрозорих вікон, через низьку робочу температуру (200^{0}C) [2].

Серед відомих на сьогодні радіопрозорих матеріалів особливої уваги заслуговує кераміка, перевагами якої є однорідність структури, сталість властивостей, що забезпечує можливість експлуатації при високих температурах, термоударах, абразивних впливах, а також кліматична витривалість, яка визначає доцільність використання керамічних матеріалів при створенні захисних елементів ракето-космічної техніки для всепогодних умов експлуатації.

В Україні неметалічні РПМ розробляли ДП «УкрНДІскла» та КДНВП «Кварсит» [3], з яких виготовляють обтічники для радіолокаційних головок самонаведення ракет класу «земля–повітря» та «повітря–повітря» з використанням кварцової кераміки та літійалюмосилікатної склокераміки. Основним недоліком цих матеріалів є обмежена температура експлуатації та недостатня стабільність діелектричних властивостей при високих температурах. Крім того, технологія виготовлення таких матеріалів відрізняється високою енергоємністю.

Слід зазначити, що жоден з існуючих на сьогодні промислово освоєних радіпорозорих керамічних і склокристалічних матеріалів не задовольняють комплекс вимог, що висувається до конструкційних РПМ через невисоку температуру експлуатації (до 1100^{0}C). В свою чергу, високотемпературна кераміка на основі нітридів (BN, Si_3N_4, AlN), а також β-сіалону ($Si_2Al_4O_4N_4$) піддається окисненню у високотемпературних газових потоках та втрачає міцність. Натомість високотемпературна радіопрозора кераміка на основі чистих оксидів не піддається окисненню, але при роботі за температури понад 800^{0}C втрачає здатність пропускати радіохвилі НВЧ діапазону [4]. Суттєві переваги в цьому сенсі мають керамічні матеріали на основі алюмосилікатів, зокрема кордієриту [5], але технологія їх виготовлення відрізняється багатостадійністю та високою енергоємністю.

Враховуючи екстремальні умови, що створюються на поверхні гіперзвукових літальних апаратів та жорсткі вимоги щодо радіопрозорості захисних елементів в робочому інтервалі частот і температур, на особливу увагу заслуговують гетерофазні керамічні радіопрозорі матеріали. Так, до прикладу, автори роботи [6] свідчать про ефективність комбінування фаз славсоніту, ганіту і рутилу для отримання кераміки з низькими діелектричними втратами та високою міцністю. Проте ці дослідження на дають цільної уяви про фізико-хімічні процеси формування гетерофазних керамік, а інформація щодо впливу фазових комбінацій на функціональні НВЧ-характеристики і експлуатаційні властивості радіопрозорих керамічних матеріалів є дуже обмеженою, що вказує на епізодичний характер таких досліджень.

Враховуючи комплекс вимог до матеріалів для виготовлення обтічників високошвидкісних літальних апаратів представляє цікавість отримання керамічних РПМ на основі славсоніту ($SrAl_2Si_2O_8$), цельзіану ($BaAl_2Si_2O_8$) та віллеміту (Zn_2SiO_4), які характеризуються низькими діелектричними втратами (ε=5–8, tg$\delta \leq (1-50)\cdot 10^{-4}$), температурою плавлення в межах 1650–1750^{0}C, низьким ТКЛР$\leq 3,8\cdot 10^{-6}$ K^{-1}, високою міцністю (E=110–115 ГПа) та сталими електродинамічними характеристиками в діапазоні робочих частот 0,3–30,0 ГГц. Попередні дослідження [7,8] свідчать, що поліпшення діелектричних характеристик керамічних РПМ та забезпечення їх стабільності можуть бути досягнуті завдяки синтезу

комбінацій вищевказаних цільових сполук: віллеміту Zn_2SiO_4, цельзіану $BaAlSi_2O_8$ та славсоніту $SrAlSi_2O_8$, які здатні забезпечити комплекс необхідних для радіопоглинаючих конструкційних матеріалів функціональних властивостей та підвищити експлуатаційну надійність авіоніки, зокрема систем зв'язку, навігації, керування, відстеження розпізнавання цілей, координації та наведення тощо.

Треба зауважити, що абсолютна більшість розробок в сфері створення НВЧ-керамік спирається на високотемпературні процеси синтезу цільових фаз і наступного випалу виробів. Перспективним є створення енергоощадних технологій матеріалів для радіочастотної передачі з температурою експлуатації понад 1200^0C та низькими втратами. Враховуючи цей факт, вважаємо за необхідне дослідити можливість зниження температур перебігу цих процесів за умови досягнення заданого фазового складу та однорідної мікроструктури кераміки із максимальним рівнем спікання. Створення енергоощадної технології гетерофазної НВЧ-кераміки на основі фаз цельзіану, славсоніту та віллеміту та їх комбінацій та опрацювання на їх основі параметрів виробництва радіопрозорих вікон дозволить розширити номенклатуру високотемпературних матеріалів і створить підґрунтя для розвитку високотехнологічного вітчизняного виробництва захисних елементів антенних систем радіокерування ракетної техніки.

Метою роботи є розробка рецептурно-технологічних параметрів синтезу радіопрозорих керамік на основі комбінацій цільових фаз (цельзіану, славсоніту, вілеміту) та опрацювання технології виготовлення з них радіопрозорих вікон для радіокерованої ракетної техніки.

Методика експерименту

Методологія досліджень ґрунтується на науково-обґрунтованих підходах до проектування складів оксидних композицій для одержання керамічних матеріалів з цільовим фазовим складом за знижених температур синтезу, які передба- чають використання відомостей щодо будови багатокомпонентних систем фазотвірних оксидів, термодинамічний аналіз реакцій фазоутворення з урахуванням складу сировинних композицій, застосування оригінальних методів прогнозування властивостей та комплексні експериментальні дослідженнях властивостей зразків, отриманих за результатами оптимізації параметрів розробленої енергоощадної технології.

Перший етап роботи передбачав проектування складу оксидних та сировинних композицій для низькотемпературного синтезу заданих комбінацій цільових фаз ($BaAl_2Si_2O_8$, $SrAl_2Si_2O_8$, Zn_2SiO_4) на основі дослідження будови базових оксидних систем, проведення в них графо-аналітичних розрахунків, а також термодинамічного аналізу реакцій, що передбачають одночасне утворення цільових фаз.

Наступним кроком стало визначення ефективних шляхів зниження технологічних енерговитрат на етапах синтезу порошків заданого фазового складу, формування напівфабрикатів та випалу готових виробів. При цьому досліджена можливість інтенсифікації процесів фазоутворення при синтезі НВЧ-керамік заданого складу шляхом хімічної модифікації сировинних композицій, визначені раціональний метод і технологічні параметри формоутворення виробів, а також оптимізований режим випалу виробів за рівнем спікання та функціональними властивостями.

Дослідження діелектричних та електродинамічних характеристик зразків НВЧ-керамік проводили з використанням вимірювального комплексу Keysight PNA N5227A, оснащеного спеціальним програмним забезпеченням. Для вимірювання характеристик зразків, зокрема коефіцієнтів відбиття та передачі електромагнітної хвилі, використовували стандартний прямокутний хвильовід розміром 7,2×3,4 мм в мікрохвильовому діапазоні частот від 26 до 37,5 ГГц.

Визначення структурно-фазових особливостей готових виробів здійснювали з використанням методів рентгенофазового аналізу (SHIMADZU XRD-6000) та скануючої електронної мікроскопії (електронний мікроскоп JSM-6390LV фірми Jeol).

Результати та їх обговорення

Необхідною умовою для проєктування керамічних матеріалів заданого фазового складу за знижених температур синтезу є наявність відомостей про субсолідусну будову оксидних систем $RO-Al_2O_3-SiO_2$ (RO= SrO, BaO, ZnO), які є основою для створення моно- та гетерофазних радіопрозорих керамік. Проєктування складів оксидних композицій базувалось на використанні даних щодо геометро-топологічної характеристики фаз, елементарних політопів і температур евтектик чотирикомпонентних систем $SrO-BaO-Al_2O_3-SiO_2$ та $SrO-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$ та $BaO-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$, отриманих нами раніше [9–11].

З результатів термодинамічних досліджень визначено стабільні комбінації фаз в базових оксидних системах, які можуть скласти основу радіопрозорої кераміки [9,12]:

а) $SrO-BaO-Al_2O_3-SiO_2$:

$BaAl_2Si_2O_8-SrAl_2Si_2O-SrSiO_3-SiO_2$; $SrAl_2O_4-SrAl_2Si_2O_8-Sr_2Al_2SiO_7-BaAl_2Si_2O_8$; $SrAl_2Si_2O_8-BaAl_2Si_2O_8-Al_6Si_2O_{13}-SiO_2$; $Al_2O_3-SrAl_2Si_2O_8-BaAl_2Si_2O_8-Al_6Si_2O_{13}$; $Al_2O_3-SrAl_2Si_2O_8-BaAl_2Si_2O_8-SrAlO_4$; $BaAl_2Si_2O_8-SrSiO_3-SrAl_2Si_2O_8-Sr_2Al_2SiO_7$;

б) $SrO-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$:

$SiO_2-ZnAl_2O_4-Zn_2SiO_4-SrAl_2Si_2O_8$; $SiO_2-Sr_2ZnSi_2O_7-Zn_2SiO_4-SrAl_2Si_2O_8$; $ZnAl_2O_4-Sr_2ZnSi_2O_7-SrAl_2Si_2O_8-Zn_2SiO_4$;

в) $BaO-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$:

$BaAl_2Si_2O_8-Zn_2SiO_4-ZnAl_2O_4-SiO_2$; $ZnO-Zn_2SiO_4-ZnAl_2O_4-BaAl_2Si_2O_8$.

Результати графоаналітичних розрахунків в системах фазотвірних оксидів дають підстави для одержання цих матеріалів за таких мінімальних температур:

– цельзіан-славсонітова кераміка ≈1300–1350^{0}C;

– цельзіан-віллемітова кераміка ≈1200–1250^{0}C;

– славсоніт-віллемітова кераміка ≈1150–1200^{0}C.

З урахуванням вимог щодо технологічності складу кераміки з урахуванням відомостей щодо об'ємів елементарних тетраедрів у відповідних системах, їхнього ступеня асиметрії та температур евтектики, для розробки радіопрозорих керамічних матеріалів цельзіан-славсонітового, славсоніт-віллемітового та цельзіан-віллемітового складу обрані ділянки оксидних композицій, що показані на рис. 1.

В межах обраних концентрацій компонентів базових оксидних систем (рис. 1) розроблені модельні композиції для отримання радіопрозорої кераміки, хімічний та фазовий склад яких наведено в табл 1.

Результати досліджень фазового складу продуктів синтезу, одержаних з використанням модельних композицій показали наявність як цільових фаз, так і проміжних і супутніх сполук, утворення яких слід уникати. Враховуючи одержані дані, а також результати попередніх досліджень, спрямованих на пошук шляхів інтенсифікації процесів спрямованого фазоутворення [13], проведено модифікацію модельних сумішей з використанням добавок, здатних забезпечити повноту синтезу цільових фаз та їх комбінацій, виключити небажані супутні сполуки, а також розширити інтервал спікання кераміки для попередження високотемпературної деформації виробів.

Вид і кількість добавок для інтенсифікації утворення цільових фаз кераміки різного складу визначали експериментально. За результатами досліджень рекомендовано використання таких добавок (з розрахунку понад 100% на суху речовину):

1) 1 мас.% евтектичної композиції системи Li_2O-SnO (яка містить 60 мас.% SnO_2 і 40 мас.% Li_2O) – для радіопрозорої кераміки серій РПК-С, РПК-Ц, РПК-ЦС;

2) 2 мас.% Li_2O – для радіопрозорої кераміки серії РПК-ЦВ;

3) 4 мас.% $K(AlSi_3O_8)$ – для радіопрозорої кераміки серії РПК-СВ.

Таблиця 1

Фазовий склад продуктів синтезу на основі модельних оксидних композицій

Шифр зразків*	Задане співвідношення цільових фаз*	Температура синтезу, ^{0}C	Вміст компонентів, мас.%					Фазовий склад за даними рентгенофазового аналізу
			SiO_2	Al_2O_3	BaO	SrO	ZnO	
С-0	С	1350	36,89	31,30	–	31,81	–	$SrAl_2Si_2O_8$, α-Al_2O_3, $SrSiO_3$
Ц-0	Ц	1350	31,98	27,17	40,85	–	–	α-$BaAl_2Si_2O_8$, β-$BaAl_2Si_2O_8$
ЦС-0-I	Ц:С=1:3	1350	35,53	30,15	11,34	22,98	–	$Ba_{0,5}Sr_{0,5}Al_2Si_2O_8$, $Sr_{0,2}Al_2O_3$, SiO_2
ЦС-0-II	Ц:С=1:1		34,27	29,08	21,87	14,78	–	$Ba_{0,5}Sr_{0,5}Al_2Si_2O_8$, $Ba_{0,75}Sr_{0,25}Al_2Si_2O_8$, $BaSrSi_3O_8$
ЦС-0-III	Ц:С=3:1		33,1	28,09	31,68	7,13	–	$Ba_{0,5}Sr_{0,5}Al_2Si_2O_8$, $Ba_{0,75}Sr_{0,25}Al_2Si_2O_8$, $SrAl_2Si_2O_8$, $Ba_{0,25}Sr_{0,75}Al_2Si_2O_8$
ЦВ-0-I	Ц:В=1:3	1250	28,78	9,76	14,68	–	46,78	$BaAl_2Si_2O_8$, $ZnSiO_4$, $ZnAl_2O_4$
ЦВ-0-II	Ц:В=1:1		30,12	17,04	25,63	–	27,21	$BaAl_2Si_2O_8$, $ZnSiO_4$, $ZnAl_2O_4$, SiO_2
ЦВ-0-III	Ц:В=3:1		31,17	22,67	34,09	–	12,07	$BaAl_2Si_2O_8$, $ZnSiO_4$, SiO_2
СВ-0-I	С:В=1:3	1200	30,21	10,25	–	10,42	49,12	$SrAl_2Si_2O_8$, $ZnSiO_4$, $ZnAl_2O_4$
СВ-0-II	С:В=1:1		32,85	18,58	–	18,88	29,69	$SrAl_2Si_2O_8$, $ZnSiO_4$, $ZnAl_2O_4$, SiO_2
СВ-0-III	С:В=3:1		35,04	25,49	–	25,90	13,57	$SrAl_2Si_2O_8$, $ZnSiO_4$, SiO_2

Примітка: * – С – славсоніт $SrAl_2Si_2O_8$, Ц – цельзіан $BaAl_2Si_2O_8$, В – вілеміт $ZnSiO_4$.

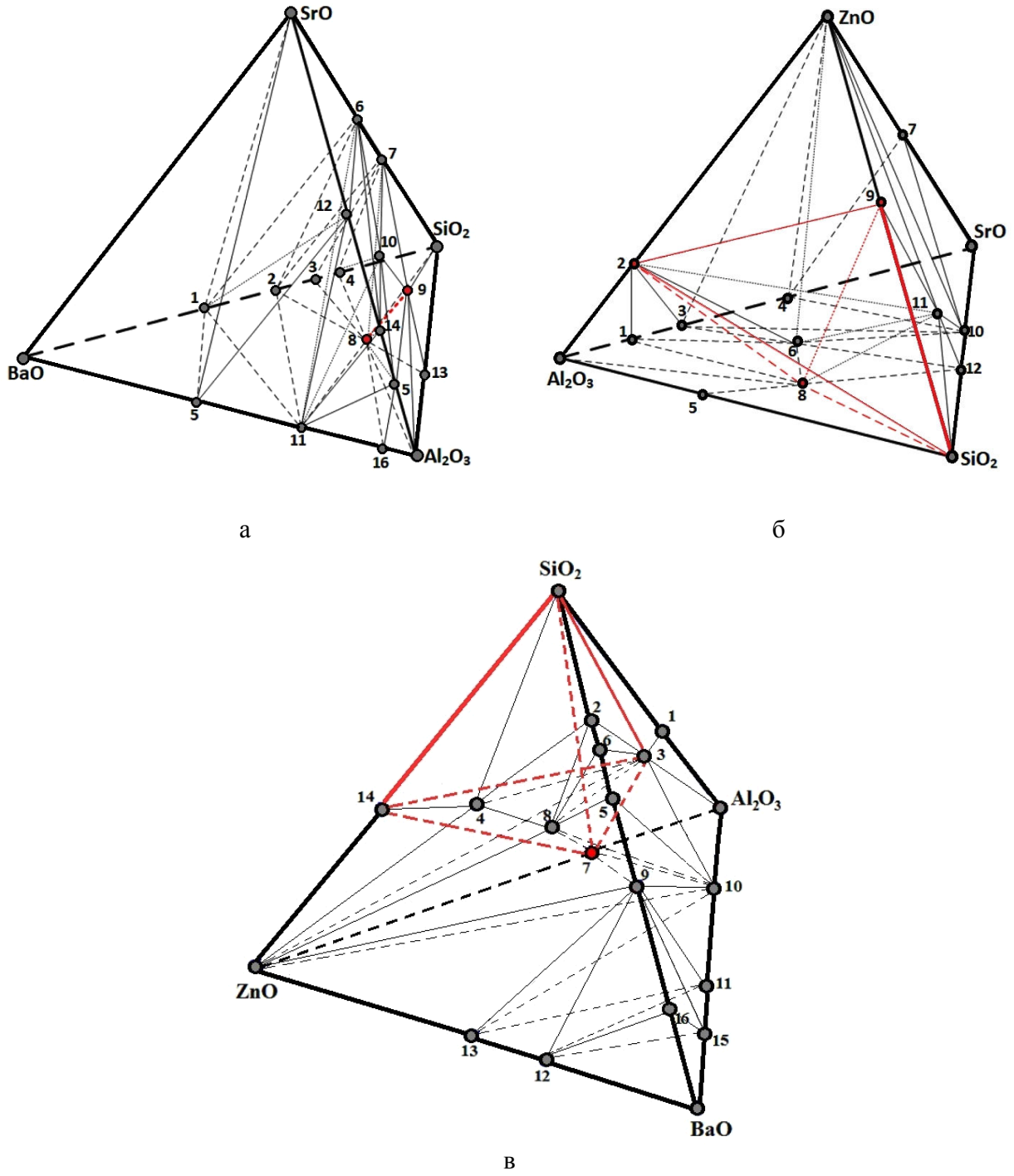

Рис. 1. Субсолідусна будова базових оксидних систем та ділянка оксидних композицій, обрана розробки радіопрозорої кераміки: а – $SrO–ZnO–Al_2O_3–SiO_2$ (1 – $SrAl_4O_7$; 2 – Al_2ZnO_4; 3 – $SrAl_2O_4$; 4 – $Sr_3Al_2O_6$; 5 – $Al_6Si_2O_{13}$; 6 – $Sr_2Al_2SiO_7$; 7 – $SrZnO_2$; 8 – $SrAl_2Si_2O_8$; 9 – Zn_2SiO_4; 10 – Sr_2SiO_4; 11 – $Sr_2ZnSi_2O_7$; 12 – $SrSiO_3$); б – $SrO–BaO–Al_2O_3–SiO_2$ (1 – Ba_2SiO_4; 2 – $BaSiO_3$; 3 – $Ba_2Si_3O_8$; 4 – $BaSi_2O_5$; 5 – $Ba_3Al_2O_6$; 6 – Sr_2SiO_4; 7 – $SrSiO_3$; 8 – $BaAl_2Si_2O_8$; 9 – $SrAl_2Si_2O_8$; 10 – $Sr_2Al_2SiO_7$; 11 – $BaAl_2O_4$; 12 – $Sr_3Al_2O_6$; 13 – $Al_6Si_2O_{13}$; 14 – $SrAl_2O_4$; 15 – $SrA_{l4}O_7$; 16 – $Ba_7Al_{64}O_{103}$); в – $BaO–ZnO–Al_2O_3–SiO_2$ (1 – $Al_6Si_2O_{13}$; 2 – $BaSi_2O_5$; 3 – $BaAl_2Si_2O_8$; 4 – $BaZn_2Si_2O_7$; 5 – $BaSiO_3$; 6 – $Ba_2Si_3O_8$; 7 – $ZnAl_2O_4$; 8 – $Ba_2ZnSi_2O_7$; 9 – Ba_2SiO_4; 10 – $BaAl_2O_4$; 11 – $Ba_4Al_2O_7$; 12 – Ba_2ZnO_3; 13 – $BaZnO_2$; 14 – Zn_2SiO_4; 15 – $Ba_3Al_2O_6$; 16 – Ba_3SiO_5)

Технологія виготовлення вікон для антенно-хвильовідних систем включала два етапи: на першому відбувався синтез керамічних матеріалів із заданою комбінацією цільових фаз, на другому – виготовлення виробів, яке передбачає формування напівфабрикатів та їх випал. Як вихідні матеріали використовували чистий молотий кварц і технічні продукти: глинозем, карбонати барію та стронцію, цинкові білила.

Сировинні матеріали попередньо подрібнювали до повного проходження крізь сито № 0063. Шихти готували шляхом дозування і триразового пропускання сировинних сумішей крізь сито № 015 для більш рівномірного розподілу компонентів. Брикети формували напівсухим пресуванням на лабораторному гідравлічному пресі ПРГ-10 при вологості порошку 8% і питомому тиску 20 МПа. Як тимчасову зв'язку використовували 10%-ний водний розчин КМЦ. Після сушки до залишкової вологості менше 1% зразки випалювали в лабораторній муфельній зі швидкістю підйому температури 15^{0}С/хв та витримкою 1 год за максимальної температури з наступним охолодженням, яке відбувалось разом із піччю.

Температуру випалу зразків кераміки різного складу визначали за діаграмами плавлення відповідних оксидних композицій, побудованих на основі базових оксидних систем. Одержані продукти синтезу піддавали помелу в планетарному млині впродовж 30 хв до залишку на ситі № 0063 не більше 1%. Вироби складної конфігурації формували напівсухим пресуванням у металевих формах під тиском 20 МПа при вологості пресопорошку 6–7%. Для забезпечення бездефектного вилучення напівфабрикатів з форми використовували графітову обмазку. Після сушіння залишкова вологість напівфабрикатів, які подавались на випал, не перевищувала 0,5%. Режим випалу виробів, визначений для кожного керамічного матеріалу експериментально, наведений у табл. 2, в якій узагальнені технологічні параметри виготовлення вікон для антенно-хвильовідних систем.

За результатами дослідження фазового складу зразків розроблених моно- і гетерофазних керамічних матеріалів та порівняльного аналізу їх функціональних та експлуатаційних властивостей визначені раціональні склади оксидних і сировинних композицій, які характеризуються наступними співвідношеннями цільових фаз: РПК-С та РПК-Ц (склад керамік відповідає стехіометричному складу славсоніту і целізану, відповідно), РПК-ЦС (Ц:С=1,0:3,0), РПК-ЦВ (Ц:В=1,0:1,0), РПК-СВ (С:В=1,0:0,8).

Технологічні схеми виготовлення виробів з використанням розроблених моно- та гетерофазних керамік надано на рис. 2.

Специфіка експлуатації виробів визначає підвищені вимоги до точності їх розмірів та якості поверхні (обмеження з шорсткості, відсутності сколів та мікротріщин). Тому випалені вироби піддають механічній обробці. Типовий алгоритм

Таблиця 2

Технологічні параметри виготовлення вікон для антенно-хвильовідних систем

Технологічні параметри	Значення параметрів для одержання виробів з використанням кераміки складу				
	РПК-Ц	РПК-С	РПК-ЦС	РПК-ЦВ	РПК-СВ
Тонкість помелу сировинних матеріалів (залишок на ситі № 0063, %)	≤1				
Вологість шихти при пресуванні брикетів, %	7–8				
Режим випалу брикетів (синтез цільових фаз):					
- максимальна температура, ^{0}С	1250	1250	1250	1150	1100
- тривалість витримки, год	2	2	2	2	2
Тонкість подрібнення брикетів, мм	2–3				
Тривалість помелу в планетарному млині, год	0,5				
Тонкість порошку (залишок на ситі № 0063, %)	≤1				
Вологість прес-порошку, %	6–7				
Тиск пресування, МПа	20				
Температура сушки напівфабрикату, ^{0}С	90–110				
Залишкова вологість після сушки, %	0,5				
Режим випалу виробів:					
- максимальна температура, ^{0}С	1350	1350	1350	1200	1200
- тривалість витримки, год	4	4	4	2	2

процесу прецизійного оброблення радіопрозорих вікон складається з чистового шліфування та доведення до заданих розмірів (в разі необхідності). Після механічної обробки вироби передають для радіоналаштування до спеціалізованої лабораторії.

На рис. 3 наведено фотознімки готових виробів, а також форм, які були використані для їх виготовлення.

Порівняльна характеристика властивостей розробленої лінійки радіопрозорих керамічних матеріалів та існуючих високотемпературних аналогів представлена в табл. 3

Експериментальні дослідження діелектричних та електродинамічних властивостей розроблених керамічних матеріалів показали, що вони задовольняють основні вимоги, що висуваються до високотемпературних радіопрозорих матеріалів і в діапазоні частот 25,8–37,5 ГГц характеризу-

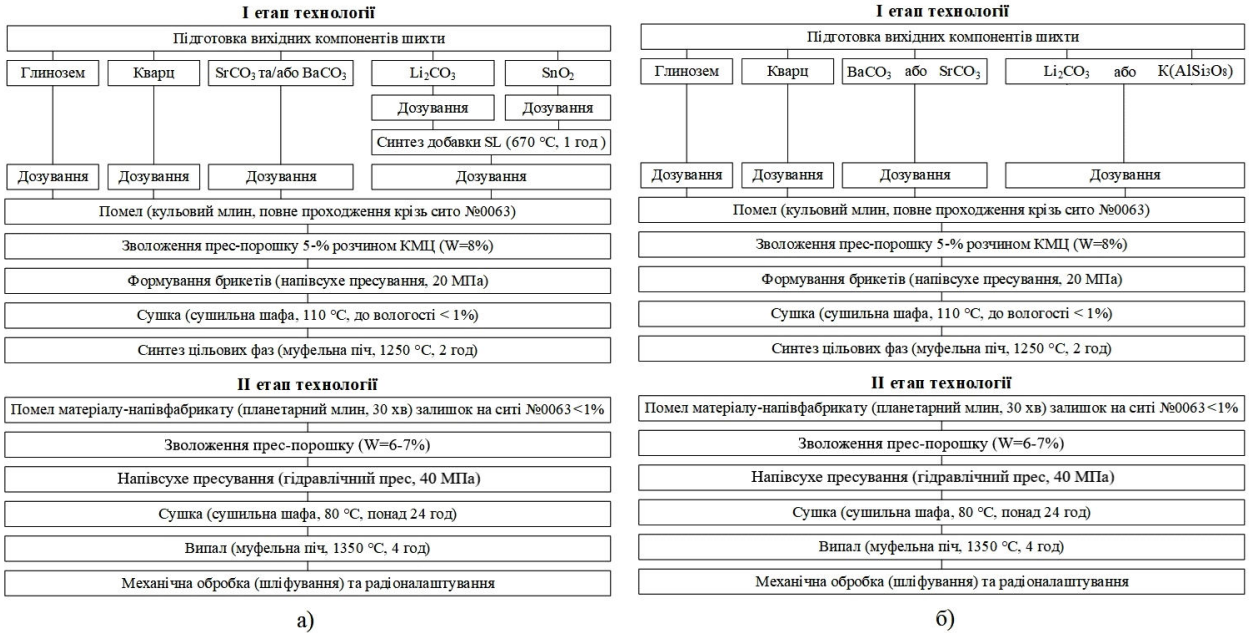

Рис. 2. Принципові технологічні схеми виготовлення радіопрозорих вікон: а) на основі монофазних керамік РПК-С, РПК-Ц, РПК-ЦС; б) на основі гетерофазних керамік РПК-ЦВ, РПК-СВ

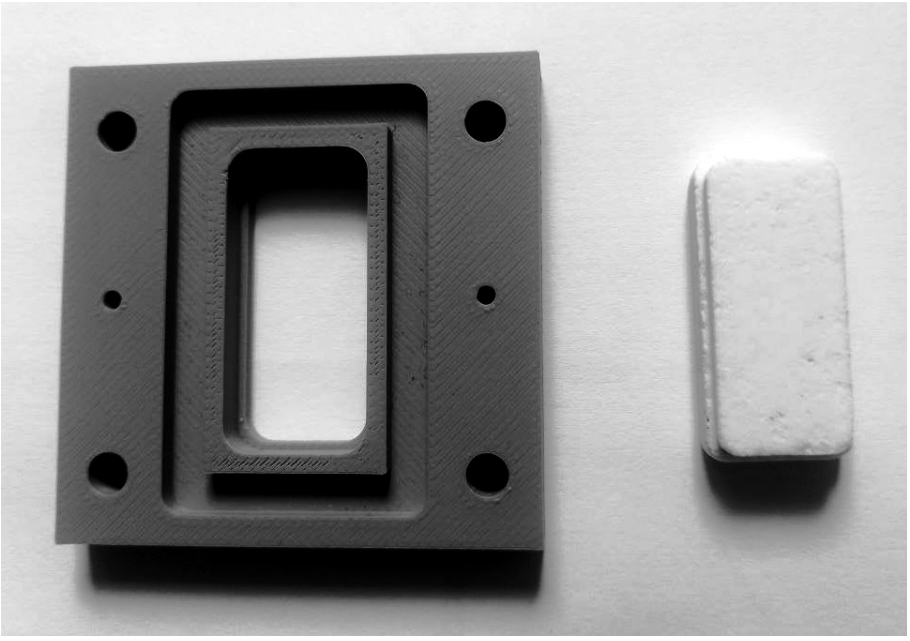

Рис. 3. Радіопрозорі вікна для антенно-хвильовідних систем

ються наступними функціональними властивостями:

– коефіцієнт передачі $k_{пер}$ (а)=–5,8...–1,9 дБ ($k_{пер}$=0,3...0,7);

– діелектрична проникність ε=4,1...5,8;

– діелектричні втрати tgδ=0,005...0,013.

Вказані характеристики є стабільними у вищевказаному частотному діапазоні радіохвиль, що є необхідною умовою надійного функціонування розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів та виробів з них, які призначені для авіаційної, ракетної та космічної техніки.

Для розроблених матеріалів характерно, що зі збільшенням частоти спостерігається загальна тенденція до збільшення коефіцієнта пропускання та зменшення коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль, що свідчить про покращення пропускання матеріалів у міліметровому діапазоні. Найбільший ефект збільшення коефіцієнта пропускання (0,65 та 0,59) зафіксований для зразків РПК-ЦС та РПК-СВ на частоті 38 ГГц. Це дозволяє використовувати кераміку РПК-ЦС в умовах, де важливим є комбінування значного поглинання та помірного пропускання на нижчих частотах. Натомість для роботи на вищих частотах найбільш ефективною є кераміка РПК-СВ, яка відрізняється кращим пропусканням та зменшеним відбиттям хвиль.

За визначеними показниками вогнетривкості розроблених матеріалів зроблено висновок щодо температур їх служби: вироби, виготовлені з використанням монофазної кераміки, зберігатимуть працездатність за максимальної температури експлуатації 1500^{0}С. Натомість гетерофазна кераміка придатна до використання в елементах авіаційних об'єктів, що зазнають термічних навантажень не вище 1100^{0}С.

Висновки

Створення лінійки керамічних матеріалів на основі фаз цельзіану, славсоніту, віллеміту та їх комбінацій дозволило розширити номенклатуру радіопрозорих матеріалів з підвищеною температурою служби та високою міцністю. Особливість розроблених матеріалів полягає у синергетичному поєднанні сполук, синтез яких забезпечує не лише необхідні діелектричні характеристики радіопрозорих керамік, а й високу стійкість до механічних і температурних впливів, що обумовлює підвищення надійності роботи та тривалості експлуатації зовнішніх захисних елементів систем радіокерування в екстремальних умовах експлуатації високошвидкісних літальних апаратів.

Важливою відмінністю розроблених керамічних матеріалів від інших високотемпературних РПМ є сталість діелектричних характеристик та низькі діелектричні втрати в широкому температурному і частотному діапазонах, що забезпечує надійне функціонування виробів з них (на відміну від безкисневої кераміки, яка з часом втрачає властивості внаслідок окиснення). Резуль-

Таблиця 3

Порівняльна характеристика розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів

Властивості	Розроблені радіопрозорі керамічні матеріали					Ceralloy 147-01EXP (Si_3N_4)	Кварцова кераміка ТСМ-983 КНВП «Кварсит»	Ситал АС-418 КНВП «Кварсит»
	РПК-С	РПК-Ц	РПК-ЦС	РПК-СВ	РПК-ЦВ			
Уявна густина ρ, кг/м^3	2750	2650	3000	2910	2990	1800–2500	1900–2200	2500–2600
Діелектрична проникність ε (26,0–37,5 ГГц)	4,7–4,8	4,4–4,6	5,6–5,7	5,2–5,4	2,4–2,5	4,0–6,0	3,3–3,8	7,5
Діелектричні втрати tgδ (26,0–37,5 ГГц)	0,006–0,008	0,005–0,007	0,010–0,013	0,008–0,010	0,002–0,003	0,002–0,005	<0,001	0,015
Межа міцності при згині, МПа	360	270	175	201	170	100–200	35–80	100–145
Вогнетривкість, ^{0}С	1640	1690	1670	1240	1310	–	–	–
Температура експлуатації $T_{експл}$, ^{0}С	1500	1500	1500	1100	1150	1400	1200	800

тати досліджень електродинамічних показників матеріалів підтверджують правомірність використання нової лінійки кераміки як радіопрозорих матеріалів для застосування в міліметровому діапазоні хвиль, а також демонструють перспективність розроблених керамік для виготовлення радіопрозорих елементів з керованими електродинамічними властивостями залежно від робочого діапазону частот.

Розроблені технологічні параметри забезпечують реалізацію твердофазного синтезу славсоніту, цельзіану та вілеміту, а варіювання їх співвідношень у фазовому складі керамічних матеріалів дозволяє розширити діапазон їх корисного використання. Комплекс запропонованих технологічних рішень створив підґрунтя для розробки технології виготовлення радіопрозорих вікон для антенно-хвильовідних систем радіокерованої ракетної техніки, яка, завдяки спрямованому фазоутворенню за знижених на 100–150^{0}C температур, дозволить суттєво зменшити енергоємність виробництва.

Подяка

Дослідження здійснювалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2023.04/0117 «Технологія виготовлення керамічних радіопрозорих вікон для антенно-хвильоводних систем сучасної радіокерованої ракетної техніки».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kenion T., Yang N., Xu C.* Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: a review // J. Eur. Ceram. Soc. – 2022. – Vol.42. – No. 1. – P.1-17.

2. *Silicate* dielectric ceramics for millimetre wave applications / Kamutzki F., Schneider S., Barowski J., Gurlo A., Hanaor Dorian A.H. // J. Eur. Ceram. Soc. – 2021. – Vol.41. – No. 7. – P.3879-3894.

3. *Зінченко М.* Зона виживання // Defense Express: Людина. Техніка. Технології. – 2020. – № 1-2. – С.38-41.

4. *Research* progress of high temperature resistant electromagnetic wave-transparent materials / Xiang T., Li D., Li J., Wang Y., Wan F., Liu R. // Mater. Rep. – 2023. – Vol.37. – No. 18. – Art. No. 22090029.

5. *Aspects* of development and properties of densely sintered of ultra-high-frequency radio-transparent ceramics of cordierite composition / Zaichuk A., Amelina A., Kalishenko Y., Hordieiev Y., Saltykov D., Sribniak N., et al. // J. Korean Ceram. Soc. – 2021. – Vol.58. – P.483-494.

6. *Chen S., Zhu D.* Low-temperature sintering behavior and properties of monoclinic-$SrAl_2Si_2O_8$ ceramics prepared via an aqueous suspension milling process // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2016. – Vol.27. – No. 11. – P.11127-11136.

7. *До питання* про створення радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи $RO–Al_2O_3–SiO_2$ / Лісачук Г.В., Зінченко С.В., Захаров А.В. та ін. // Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони: колективна монографія / за заг. ред. проф. А.П. Марченка. – Одеса: Видавничий дім «Гельветика». – 2021. – С.95-128.

8. *Preparation* of radiotransparent ceramic materials based on compositions of the BaO ZnO Al_2O_3 SiO_2 system / Fedorenko O.Yu., Lisachuk G.V., Bilohubkina K.V., Kryvobok R.V. // Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions: collective monograph. – Riga, Latvia: «Baltija Publishing». – 2021. – P.373-403.

9. *Спряжені* реакції в багатокомпонентній системі $SrO–BaO–Al_2O_3–SiO_2$ / Кривобок Р.В., Пітак Я.М., Лісачук Г.В., та ін. // Питання хімії та хім. технол. – 2024. – № 5. – С.138-145.

10. *Subsolidus* structure of the $ZnO–SrO–Al_2O_3–SiO_2$ system as a base for designing radiotransparent ceramics / Fedorenko E., Lisachuk G., Prytkina, M., et al. // East.-Eur. J. Enterprise Technol. – 2020. – Vol.6. – No. 6(108). – P.6-14.

11. *Technology* of production of radio-transparent ceramic materials / Kryvobok R.V., Bilogubkina K.V., Fedorenko O.Y., Lisachuk G.V., Voloshchuk V.V., Tarasenko O.M. // 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology. – Kharkiv, Ukraine. – 2024. – P.1-6.

12. *Thermodynamic* analysis of solid phase reactions in SrO Al_2O_3 SiO_2 system / Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Fedorenko E.Y., Prytkina M.S. // Funct. Mater. – 2016. – Vol.23. – No. 1. – P.71-74.

13. *Дослідження* впливу інтенсифікуючих добавок на низько-температурний синтез славсоніту та цельзіану при створенні радіопрозорих керамічних матеріалів / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В. та ін. // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер. Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2020. – № 2. – С.68-74.

Надійшла до редакції 27.08.2025

TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING CERAMIC RADIO-TRANSPARENT WINDOWS FOR ANTENNA–WAVEGUIDE SYSTEMS OF ROCKET ENGINEERING

O.Yu. Fedorenko, R.V. Kryvobok *, V.V. Voloshchuk, Y.M. Pitak, O.R. Tymchenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

*** e-mail: krivobok491@gmail.com**

Reliable control of high-speed aircraft requires stable transmission of communication signals, which largely depends on the materials used for the protective elements of antenna equipment, including radio-transparent windows of antenna–waveguide systems and the microwave paths they serve. Due to the harsh operating conditions of high-speed missiles, it is necessary to use high-temperature ceramic radio-transparent materials for manufacturing external protective elements capable of ensuring reliable performance of radio-controlled equipment. The range of radio-transparent ceramic materials developed in this work and produced under optimal technological parameters is characterized by improved dielectric properties (dielectric permittivity 4.56–6.8), enhanced mechanical strength (flexural strength 172–368 MPa), and increased thermal resistance (up to 225^{0}C for slawsonite–willemite ceramics). Based on their combination of functional and operational characteristics, all developed ceramic materials meet the requirements for radio-transparent materials and can be used in the aviation and rocket industries for manufacturing protective antenna components intended for operation under severe service conditions.

Keywords: radio-transparent windows; antenna–waveguide systems; microwave paths; rocket technology; mono- and heterophase ceramics; structure and phase formation; technological parameters; technical characteristics.

REFERENCES

1. Kenion T, Yang N, Xu C. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: a review. *J Eur Ceram Soc*. 2022; 42: 1-17. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.006.

2. Kamutzki F, Schneider S, Barowski J, Gurlo A, Hanaor Dorian AH. Silicate dielectric ceramics for millimetre wave applications. *J Eur Ceram Soc*. 2021; 41: 3879-3894. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.02.048.

3. Zinchenko M. Zona vyzhyvannia [Survival zone]. *Defense Express: Liudyna. Tekhnika. Tekhnolohii*. 2020; (1-2): 38-41. (*in Ukrainian*).

4. Xiang T, Li D, Li J, Wang Y, Wan F, Liu R. Research progress of high temperature resistant electromagnetic wave-transparent materials. *Mater Rep*. 2023; 37(18): 22090029. doi: 10.11896/cldb.22090029.

5. Zaichuk A, Amelina A, Kalishenko Y, Hordieiev Y, Saltykov D, Sribniak N, et al. Aspects of development and properties of densely sintered of ultra-high-frequency radio-transparent ceramics of cordierite composition. *J Korean Ceram Soc*. 2021; 58: 483-494. doi: 10.1007/s43207-021-00125-5.

6. Chen S, Zhu D. Low-temperature sintering behavior and properties of monoclinic-$SrAl_2Si_2O_8$ ceramics prepared via an aqueous suspension milling process. *J Mater Sci Mater Electron*. 2016; 27: 11127-11136. doi: 10.1007/s10854-016-5230-x.

7. Lisachuk GV, Zinchenko SV, Zakharov AV. Do pytannia pro stvorennia radioprozorykh keramichnykh materialiv na osnovi systemy $RO–Al_2O_3–SiO_2$ [On the issue of creating radio-transparent ceramic materials based on the $RO–Al_2O_3–SiO_2$ system]. In: *Naukovo-tekhnichni pidkhody do vyrishennia aktualnykh problem rozbudovy sektoru bezpeky i oborony: kolektyvna monohrafiia* [Scientific and technical approaches to solving current problems of developing the security and defense sector: a collective monograph]. Odesa: Helvetyka; 2021. p. 95-128. *(in Ukrainian*).

8. Fedorenko OYu, Lisachuk GV, Bilohubkina KV, Kryvobok RV. Preparation of radiotransparent ceramic materials based on compositions of the $BaO–ZnO–Al_2O_3–SiO_2$ system. In: *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions: collective monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing; 2021. p. 373-403. doi: 10.30525/978-9934-26-025-4-18.

9. Kryvobok RV, Pitak YM, Lisachuk GV, Voloshchuk VV, Grebenyuk OO, Kudii MO, et al. Spriazheni reaktsii v bahatokomponentnii systemi $SrO–BaO–Al_2O_3–SiO_2$ [Coupled reactions in the system $SrO–BaO–Al_2O_3–SiO_2$]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024; (5): 138-145. (*in Ukrainian*). doi: 10.32434/0321-4095-2024-156-5-138-145.

10. Fedorenko E, Lisachuk G, Prytkina M. Subsolidus structure of the $ZnO–SrO–Al_2O_3–SiO_2$ system as a base for designing radiotransparent ceramics. *East Eur J Enterprise Technol*. 2020; 6(108): 6-14. doi: 10.15587/1729%2D4061.2020.217009.

11. Kryvobok RV, Bilogubkina KV, Fedorenko OY, Lisachuk GV, Voloshchuk VV, Tarasenko OM. Technology of production of radio-transparent ceramic materials. *IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2024. p. 1-6. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878028.

12. Lisachuk GV, Kryvobok RV, Zakharov AV, Fedorenko EY, Prytkina MS. Thermodynamic analysis of solid phase reactions in $SrO–Al_2O_3–SiO_2$ system. *Funct Mater*. 2016; 23(1): 71-74. doi: 10.15407/fm23.01.071.

13. Lisachuk G, Kryvobok R, Zakharov A, Voloshchuk V, Lisachuk L, Chefranov E. Doslidzhennia vplyvu intensyfikuiuchykh dobavok na nyzko-temperaturnyi syntez slavsonitu ta tselzianu pry stvorenni radioprozorykh keramichnykh materialiv [Study of the influence of intensifying additives on the low-temperature synthesis of slawsonite and celsian in the creation of radiotransparent ceramic materials]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI». Seriia: Khimiia, Khimichna Tekhnolohiia ta Ekolohiia*. 2020; (2): 68-74. (*in Ukrainian*) doi: 10.20998/2079-0821.2020.02.09.