

Г.В. ЛИСАЧУК, Р.В. КРИВОБОК, А.В. ЗАХАРОВ, В.В. ВОЛОЩУК, Л.М. ЛИСАЧУК, Є.В. ЧЕФРАНОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНТЕНСИФІКУЮЧИХ ДОБАВОК НА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СИНТЕЗ СЛАВСОНІТУ ТА ЦЕЛЬЗІАНУ ПРИ СТВОРЕННІ РАДІОПРОЗОРИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проведені дослідження стосуються розробки конструкційних радіопрозорих керамічних матеріалів на основі чотирикомпонентної системи $\text{BaO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. У зв'язку з широким використанням на сучасних авіаційних об'єктах засобів радіолокації розробка радіопрозорих обтічників для них є досить важливим і актуальним завданням.

Призначення обтічників – захист антенних пристроїв радіолокаційних станцій від впливу навколишнього середовища в умовах польоту. Виходячи з цього, обтічники повинні задовольняти складному комплексу вимог до аеродинамічних, термічних, радіотехнічних і механічних властивостей. Ці вимоги при надзвукових швидкостях польоту сучасних об'єктів істотно підвищуються, так як покращення аеродинамічних форм, підвищення механічної міцності і термостійкості обтічників суперечить інтересам радіотехніки, приводячи до значного погіршення їх радіопрозорості і до спотворень діаграм спрямованості антен. Наслідком цього є зменшення дальності дії радіолокаційних станцій і серйозні погіршення їх характеристик точності.

Метою проведених досліджень було отримання на основі системи $\text{BaO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ кристалічних фаз славсоніту та цельзіану при знижених температурі та часу синтезу, шляхом введення інтенсифікаторів спікання флюсоуючої та модифікуючої дії.

Досліджено вплив ряду добавок на інтенсифікацію низькотемпературного синтезу славсоніту та цельзіану. Показано позитивний вплив евтектичної добавки системи $\text{SnO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ на отримання щільноспеченого керамічного матеріалу на основі твердих розчинів славсоніту та цельзіану моноклінної сингонії. Встановлено, що за своїми діелектричними властивостями отриманий керамічний матеріал може бути віднесений до конструкційних радіопрозорих матеріалів.

Ключові слова: радіопрозора кераміка, славсоніт, цельзіан, інтенсифікатор спікання, евтектика, діелектрична проникність

Г.В. ЛИСАЧУК, Р.В. КРИВОБОК, А.В. ЗАХАРОВ, В.В. ВОЛОЩУК, Л.М. ЛИСАЧУК, Е.В. ЧЕФРАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ СЛАВСОНИТА И ЦЕЛЬЗИАНА ПРИ СОЗДАНИИ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Проведенные исследования касаются разработки конструкционной радиопрозрачных керамических материалов на основе четырёхкомпонентной системы $\text{BaO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. В связи с широким использованием на современных авиационных объектах средств радиолокации разработка радиопрозрачных обтекателей для них является достаточно важной и актуальной задачей.

Назначение обтекателей – защита антенных устройств радиолокационных станций от влияния окружающей среды в условиях полета. Исходя из этого, обтекатели должны удовлетворять сложному комплексу требований к аэродинамическим, термическим, радиотехническим и механическим свойствам. Эти требования при сверхзвуковых скоростях полета современных объектов существенно увеличиваются, так как улучшение аэродинамического форм, повышение механической прочности и термостойкости обтекателей противоречит интересам радиотехники, приводя к значительному ухудшению их радиопрозрачности и к искажениям диаграмм направленности антенн. Следствием этого является уменьшение дальности действия радиолокационных станций и серьезные ухудшения их характеристик точности.

Целью проведенных исследований было получение на основе системы $\text{BaO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ кристаллических фаз славсонита и цельзиана при пониженных температуре и времени синтеза, путем введения интенсификаторов спекания флюсоующих и модифицирующего действия. Исследовано влияние ряда добавок на интенсификацию низкотемпературного синтеза славсонита и цельзиана. Показано положительное влияние евтектической добавки системы $\text{SnO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ на получение плотноспеченного керамического материала на основе твердых растворов славсонита и цельзиана моноклинной сингонии. Установлено, что по своим диелектрическим свойствам, полученный керамический материал может быть отнесен к конструкционным радиопрозрачным материалам.

Ключевые слова: радиопрозрачная керамика, славсонит, цельзиан, интенсификатор спекания, евтектика, диелектрическая проницаемость

G. LISACHUK, R. KRYVOBOK, A. ZAKHAROV, V. VOLOSHCHUK, L. LISACHUK, E. CHEFRANOV

STUDY OF THE INFLUENCE OF INTENSIFYING ADDITIVES ON LOW-TEMPERATURE SYNTHESIS OF SLAVSONITE AND CELZIAN IN THE CREATION OF RADIOTRSPARENT CERAMIC MATERIALS

The studies carried out concern the development of structural radiotransparent ceramic materials based on the four-component system $\text{BaO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Due to the widespread use of radar equipment at modern aviation facilities, the development of radiotransparent fairings for them is a rather important and urgent task.

The purpose of the fairings is to protect the antenna devices of radar stations from environmental influences during flight. Based on this, the fairings

must meet a complex set of requirements for aerodynamic, thermal, radio engineering and mechanical properties. These requirements at supersonic flight speeds of modern objects increase significantly, since the improvement of the aerodynamic shape, the increase in the mechanical strength and thermal stability of the fairings contradicts the interests of radio engineering, leading to a significant deterioration in their radiotransparency and to distortions of antenna directional patterns. The consequence is a decrease in the range of radar stations and serious deterioration in their accuracy characteristics.

The aim of the research was to obtain, on the basis of the BaO–SrO–Al₂O₃–SiO₂ system, crystalline phases of slavsonit and celsian at low temperatures and times of synthesis, by introducing sintering intensifiers with fluxing and modifying action.

The influence of a number of additives on the intensification of the low-temperature synthesis of slavsonit and celsian is investigated. The positive effect of the eutectic additive of the SnO₂–Li₂O system on the preparation of a densely sintered ceramic material based on solid solutions of slavsonit and monoclinic celsian is shown. It has been established that, according to its dielectric properties, the obtained ceramic material can be classified as structural radio-transparent materials.

Keywords: radiotransparent ceramics, slavsonit, celsian, sintering intensifier, eutectic, dielectric constant.

Вступ. У зв'язку з широким використанням на сучасних авіаційних об'єктах засобів радіолокації розробка радіопрозорих обтічників для них є досить важливим і актуальним завданням.

Призначення обтічників – захист антенних пристроїв радіолокаційних станцій від впливу навколишнього середовища в умовах польоту. Виходячи з цього, обтічники повинні задовольняти складному комплексу вимог до аеродинамічних, термічних, радіотехнічних і механічних властивостей. Ці вимоги при надзвукових швидкостях польоту сучасних об'єктів істотно підвищуються, так як покращення аеродинамічних форм, підвищення механічної міцності і термостійкості обтічників суперечить інтересам радіотехніки, приводячи до значного погіршення їх радіопрозорості і до спотворень діаграм спрямованості антен. Наслідком цього є зменшення дальності дії радіолокаційних станцій і серйозні погіршення їх характеристик точності. Особливу роль при цьому відіграють кутові помилки, створювані обтічниками у визначенні лінії пеленга цілі (що є наслідком спотворень діаграм спрямованості), що призводять часто до повного порушення роботи ряду типів радіолокаційних станцій. Тому одним з найважливіших завдань при розробці обтічників є вирішення радіотехнічних питань і, зокрема, досягнення необхідних рівнів радіопрозорості обтічників і зменшення спотворень характеристик випромінювання антен. Ці завдання при необхідності повинні вирішуватися не тільки для фіксованої хвилі, але також для досить широкого діапазону хвиль або для декількох рознесених по частотній шкалі діапазонів.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Великі швидкості польоту об'єктів і підвищена маневреність останніх викликають появу значних механічних навантажень на обтічниках, істотний аеродинамічний нагрів їх поверхні (часто до 1000 °С і вище), ерозію за рахунок атмосферних опадів, а в деяких випадках електризацію діелект-

ричної частини обтічників, їх обмерзання. Всі ці фактори повинні враховуватися при вирішенні основного завдання – досягнення необхідних радіотехнічних параметрів обтічників [1].

В результаті огляду виробництва обтічників в Україні та закордоном встановлено, що за керамічною технологією обтічники створюють на основі кварцу, глинозему та алюмосилікатів. Алюмосилікати в свою чергу використовуються наступні: магнію – кордієрит, літію – сподумен, стронцію – славсоніт та барію – цельзіан. Останні два алюмосилікати привернули увагу науковців зовсім недавно, за рахунок комплексу властивостей, здатних зберігати свою сталість при високих температурах (1200–1400 °С) в порівнянні з іншими кристалічними фазами (до 1000 °С) [2].

Найбільш повну інформацію властивостей з точки зору створення радіопрозорих керамічних матеріалів на основі цельзіану (BaAl₂Si₂O₈) та славсоніту (SrAl₂Si₂O₈) викладено в роботі [3]. Для цельзіану температура плавлення – 1760 °С, низькі значення діелектричної проникності 6,5–7 та тангенсу кута діелектричних втрат (1–2)·10⁻⁴. Для славсоніту температура плавлення – 1654 °С, низькі значення діелектричної проникності 6,2–6,8 та тангенсу кута діелектричних втрат (1–3)·10⁻⁴ в широкому температурному та частотному діапазоні.

В переважній більшості наукових статей на тему синтезу цельзіану приводиться склокристалічна технологія його отримання, що потребує утворення розплаву при температурах понад 1800 °С [4] та складний багатогодинний відпал отриманих виробів. Так, наприклад, в роботі [4] для зменшення часу термообробки до складу матеріалу додають оксид стронцію з метою запобігання протікання поліморфних перетворень шляхом утворення твердого розчину. В роботі [5] для зниження температури отримання розплаву хімічний склад матеріалу зміщують зі стехіометричної точки в сторону метасилікату барію Це дозволяє отримати розплав при температурі 1400 °С зі збереженням механічних характеристик та,

як негативним наслідком, супутньої кристалізації метасилікату барію. Отримання кераміки на основі цельзіану шляхом твердофазового синтезу приводиться в роботі [6], де в шихтову суміш барієвмісний компонент вводиться ацетатом барію. Це дозволяє синтезувати цельзіан при температурі 1000 °C, але в гексагональній модифікації, що характеризується підвищеним значенням температурного коефіцієнту лінійного розширення $(45-50) \cdot 10^{-7}$ град⁻¹. Найбільш близьким аналогом до отриманого матеріалу є кераміка на основі системи BaO–Al₂O₃–SiO₂, яка має стабільні діелектричні характеристики в широкому температурному інтервалі. Недоліком є висока температура випалу (1500 °C) та тривалий час випалу – 150 годин [7].

Отже не викликає сумнівів той факт, що розробка нових керамічних радіопрозорих матеріалів із заданими характеристиками, сприятиме науково-технічному прогресу в радіоелектроніці. При цьому перспективним напрямком є дослідження, спрямовані на зменшення енергоємності виробництва та забезпечення високотемпературної стабільності та відтворюваності функціональних властивостей в широкому частотному діапазоні.

Мета і завдання дослідження. Метою проведених досліджень було отримання на основі системи BaO–SrO–Al₂O₃–SiO₂ кристалічних фаз славсоніту та цельзіану при знижених температурі та часу синтезу, шляхом введення інтенсифікаторів спікання флюсуючої та модифікуючої дії.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- зробити обґрунтований вибір добавок для низькотемпературного синтезу кристалічних фаз SrAl₂Si₂O₈ та BaAl₂Si₂O₈;
- дослідити вплив інтенсифікаторів спікання та їх кількості на процеси фазоутворення при створенні славсоніто-цельзіанової кераміки;
- дослідити вплив інтенсифікаторів спікання на експлуатаційні характеристики отриманих матеріалів.

Методика проведення експерименту

Рентгенівські дослідження проводили за допомогою автоматизованого рентгенівського порошкового дифрактометру Siemens D500 (CuKα1 випромінювання). Отримані експериментальні дані обробляли з застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення Powder 2. Структуру матеріалів досліджували за допомогою рентгеноспектрального аналізу (скануючий електронний мікроскоп РЕМ Phenom Pro з роздільною здатністю 1 нм). При проведенні дослід-

жень застосовували методи визначення фізико-механічних, та діелектричних властивостей матеріалів у відповідності до відомих інструкцій, технічних умов та діючих стандартів. Експериментальні значення показників знаходили як середнє арифметичне з 3 визначень. Визначення показників уявної щільності, водопоглинання та відкритої поруватості дослідних зразків проводили способом гідростатичного зважування у воді на зразках керамічних матеріалів масою від 5 до 10 г. Насичення зразків водою здійснювали після їх попереднього вакуумування. Вимірювання діелектричної проникності й тангенсу кута діелектричних втрат здійснювали на установці цифровий вимірювач E7-8CLR.

Обґрунтування вибору інтенсифікаторів спікання. До питання вибору інтенсифікаторів спікання підходили з урахуванням кількох факторів:

- це мають бути добавки, що дозволять здійснити задачу зі зниження температури синтезу славсоніту та цельзіану;
- кількість і властивості новоутвореної склофазы мають бути такими, щоб не погіршувати основні характеристики матеріалів – діелектрична проникність та тангенсу кута діелектричних втрат;
- при дотриманні перших двох пунктів синтез кристалічних фаз має пройти в повній мірі в моноклінній сингонії.

При синтезі певних кристалічних фаз підхід до механізмів дії мікродобавок в першу чергу залежить власне від механізму, по якому протікають реакції утворення даних фаз, а це можуть бути тільки, або твердофазовий синтез, або рідкофазовий. Тому й добавки в різних випадках можуть вести себе по різному, особливо в багатокомпонентній системі. На прикладі синтезу славсоніту, температура плавлення якого складає 1654 °C, а початок активного утворення при термообробці 1100 °C, добавки, що не мають евтектик зі складовими синтезу і впливають на кристалізацію (розміри, сингонію, температуру початку і т.д.) справедливо назвати модифікаторами. Добавки, що впливають на синтез шляхом утворення розплаву та відповідають за його активність та геологічні властивості є мінералізаторами.

Було зроблено припущення, що для здійснення поставленої мети найбільш допустимими добавками можуть бути поєднання класичних модифікаторів скла – сполуки лужних металів. Також для цієї мети підходить поєднання оксиду стануму з оксидом літію за рахунок низькотемпературної евтектики.

Одним із критеріїв вибору в якості інтенсифі-

фікатору фторидів лужних металів була характеристика властивостей розплаву на їх основі. Як відомо [8], такі розплави є високоактивними, з низькою в'язкістю, тому додавання такого роду інтенсифікаторів навіть в малій кількості є дієвим.

Розгляд фізико-хімічних процесів на діаграмах стану багатокомпонентних систем $\text{Li}_2\text{O}-\text{SnO}_2$, показав наявність евтектик в інтервалі температур від 450 °C до 700 °C. Згідно роботи, з бази даних схем фазових рівноваг, в системі $\text{SnO}_2-\text{Li}_2\text{O}$ [9] евтектичні склади компонентів, моль.% ($\text{XSnO}_2=0,4$; $\text{XLi}_2\text{O}=0,6$) утворюють розплав в інтервалах температур 600–700 °C.

З урахуванням перелічених факторів в роботі було обрано для вивчення наступні добавки: SnO_2 , Li_2O та евтектичний сплав на їх основі SL, оксид літію вводили карбонатом літію (Li_2CO_3). Оксид стануму має вищу температуру плавлення за температуру плавлення славсоніту та його можна віднести до групи модифікаторів, а оксид літію та евтектична добавка, з нижчими температурами плавлення та відносяться до групи мінералізаторів.

Результати експерименту та їх обговорення

Склад керамічної маси, ґрунтуючись на попередніх дослідженнях [10], відповідав відношенню кристалічних фаз славсоніту та цельзіану, як 3:1 в готовому матеріалі. Добавки вносили в шихту в кількості 0,5, 1 та 1,5 мас. % понад 100 мас.%, зразки формували методом напівсухого пресування у вигляді таблеток з діаметром 25 мм та висотою 5 мм. Випал проводили при температурах 1250, 1300 та 1350 °C з витримкою при максимальній температурі в 2 години. Оцінку впливу добавок на спікання вивчали на основі даних водопоглинання, уявної густини та відкритої поруваності (див. таб. 1 та рис. 1).

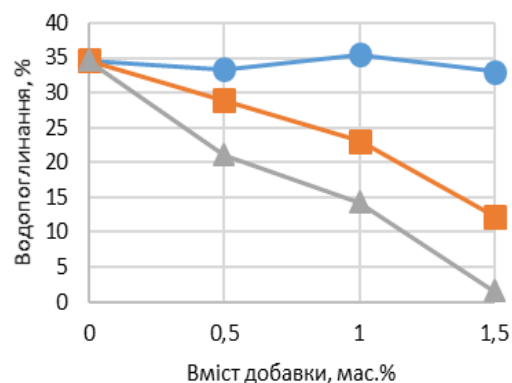
Отримані результати випалених зразків при температурі 1250 °C вказують на те, що найкращою, з точки зору інтенсифікації спікання, є евтектична добавка на основі оксидів літію і стануму. Оксиду літію зі збільшенням його вмісту незначно знижує водопоглинання, лише при кількості 1,5 мас. % спостерігається значне зниження до 1,55 %.

При температурі 1300 °C характер дії добавок на зразки фактично не змінився, відсутність водопоглинання не фіксується, хоча вже при вмісті 1 мас.% евтектичної добавки воно становить 1,25 %. Цікавим фактом є те, що при наступному збільшенні добавки SL на 0,5 мас. % водопоглинання починає підвищуватись, що можливо пояснити збільшенням сферичних пор.

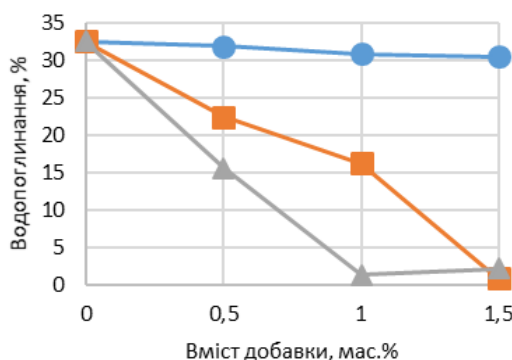
Таблиця 1 – Вплив мінералізуючих добавок та їх кількості на властивості композиції оптимального складу випалених при різних температурах

Добавка	Кількість добавки в мас. %	Водопоглинання W, %	Відкрита поруваність П, %	Уявна густина, кг/м ³
Температура випалу 1250 °C				
—	—	34,62	42,04	1380
SnO_2	0,5	33,41	40,57	1380
	1	35,48	42,15	1350
	1,5	33,06	40,44	1390
Li_2O	0,5	28,93	39,72	1560
	1	23,08	34,32	1690
	1,5	12,3	26,63	2460
SL	0,5	21,02	35,89	1940
	1	14,24	30,45	2430
	1,5	1,55	3,74	2740
Температура випалу 1300 °C				
—	—	32,53	41,51	1450
SnO_2	0,5	31,86	41,21	1470
	1	30,88	40,22	1480
	1,5	30,51	40,00	1490
Li_2O	0,5	22,4	36,66	1860
	1	16,19	33,48	2350
	1,5	0,83	2,05	2800
SL	0,5	15,57	33,16	2420
	1	1,25	3,12	2840
	1,5	2,08	5,18	2830
Температура випалу 1350 °C				
—	—	31,04	40,22	1480
SnO_2	0,5	28,35	38,17	1530
	1	26,74	37,18	1580
	1,5	20,39	35,89	2000
Li_2O	0,5	14,63	31,80	2470
	1	2,51	6,41	2900
	1,5	0	0,00	2940
SL	0,5	7,3	17,15	2670
	1	0	0,00	3070
	1,5	1,16	3,10	3040

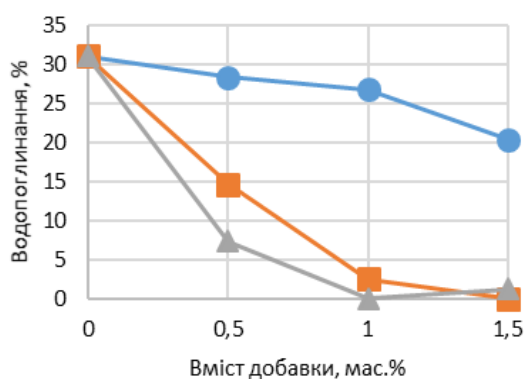
При температурі 1350 °C характер дії добавок на зразки знову подібний до дії при нижчих температурах, з незначним загальним зниженням водопоглинання. Відсутність водопоглинання спостерігається при вмісті 1 мас. % добавки SL та при 1,5 мас. % оксиду літію.



а)



б)

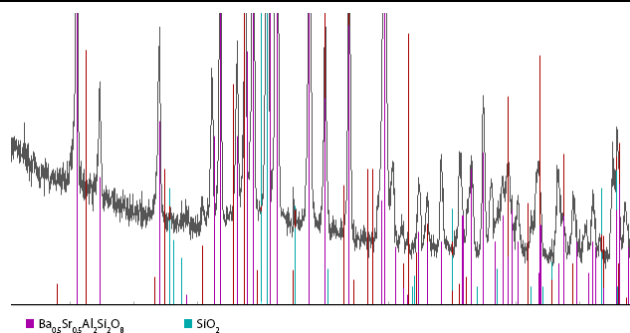


в)

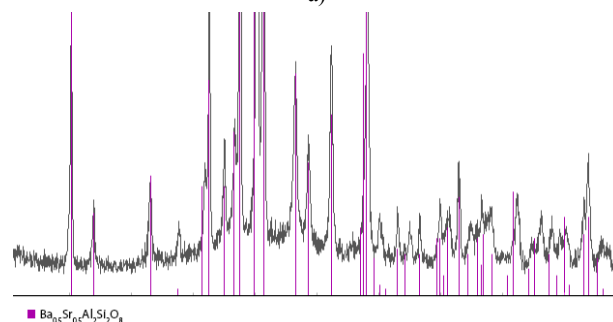
● – SnO₂, ■ – Li₂O ▲ – SL

Рисунок 1 – Вплив мінералізуючих добавок та їх кількості на водопоглинання зразків випалених при різних температурах: а) 1250 °C, б) 1300 °C та в) 1350 °C

Ступінь впливу найефективнішої добавки на процеси фазоутворення було досліджено за допомогою рентгено-фазового аналізу. Для цього було обрано рентгенограми зразків, випалені при дослідних температурах 1250 та 1350 °C, з вмістом добавки SL у кількості 1 мас.%, результати приведені у вигляді рентгенограм, рис. 2



а)



б)

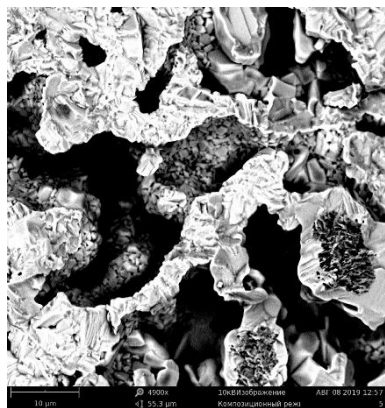
Рисунок 2 – Рентгенівський аналіз зразків:
а – випалених при 1250 °C; б – 1350 °C

Результати рентгено-фазового аналізу свідчать про повне протікання реакцій синтезу славсоніту та цельзіану при температурі 1350 °C (рис. 2, б). Тоді як при температурі синтезу 1250 °C спостерігаються сировинні (SiO₂) та проміжні (Sr_{0.2}Al₂O₃) кристалічні фази (рис. 2, а). Ці дані підтверджують ефективність евтектичної добавки, що виражено у зниженні температури синтезу необхідних кристалічних фаз з 1550 °C до 1350 °C.

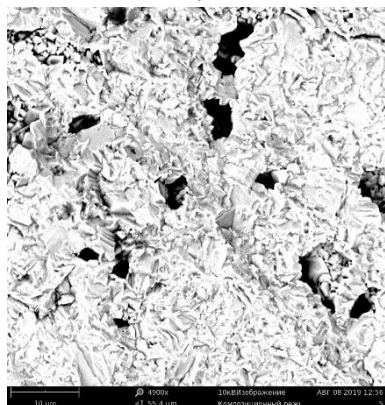
Результати скануючої електронної мікроскопії свідчать про наявність пор розміром, що зі збільшенням температури випалу зменшуються. Так, при температурі випалу 1250 °C, розмір пор складає 10–20 мкм, в матеріалі, що випалений при температурі 1300 °C, від 5 до 10 мкм, а після випалу при 1350 °C, поодинокі пори розміром до 5 мкм. Сам матеріал демонструє високу щільність доволіно переплетених кристалічних новоутворень пластинчатого виду, які за даними РФА ідентифіковані як твердий розчин складу Ba_{0.5}Sr_{0.5}Al₂Si₂O₈. Розміри кристалічних новоутворень коливаються від 2×5 мкм до 3×8 мкм. На мікрознімку матеріалу, випаленого при температурі 1250 °C (рис. 3, а), поміж кристалічних новоутворень славсоніт-цельзіанового складу зустрічаються дрібнопризматичні кристали Sr_{0.2}Al₂O₃.

Діелектричні характеристики отриманого матеріалу знаходяться в межах вимог, що висуваються до радіопрозорих матеріалів. Так діелектрична

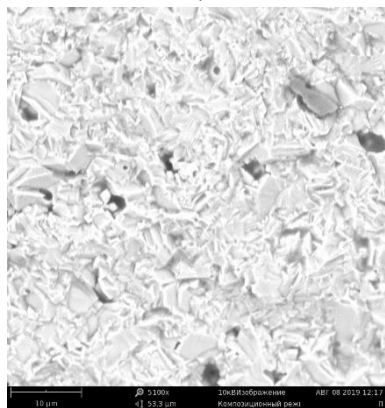
проникність зразка з 1 мас. % добавки SL становить 6,2, а тангенс кута діелектричних втрат – 0,0083.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Структура зразків з добавкою 1 мас. % SL випалених при різних температурах: а) 1250 °C, б) 1300 °C та в) 1350 °C

Позитивний ефект при введенні другого дво-валентного катіона, зокрема оксиду барію до славсонітового складу проявляється за даними авторів [11] в ослабленні росту діелектричної проникності при збільшенні температури. Тому можна вважати, що отримання термічно стабільних твердих розчинів славсоніт-цельзіанового складу сприятиме підвищенню сталості діелектричних характеристик при експлуатації об'єктів в умовах високих темпе-

ратурних навантажень, що в кінцевому рахунку забезпечить надійне керування літальним апаратом та захист радіоантен.

Висновки

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень отримані матеріали славсоніт-цельзіанового складу. Даного ефекту вдалося досягти, шляхом вибору ефективної інтенсифікуючої добавки та її кількості на основі легкоплавкої евтектики в системі $\text{SnO}_2\text{--Li}_2\text{O}$. Керамічний матеріал характеризується високою щільністю, міцністю та задовольняє вимоги, що висуваються до електрофізичних характеристик радіопрозорих матеріалів. Результати досліджень дозволяють встановити оптимальний склад композицій та умови випалу, які дозволяють отримати матеріали з мінімальною кількістю домішкових фаз та комплексом оптимальних експлуатаційних властивостей.

Список літератури

1. В.А. Каплун. Обтекатели антен СВЧ (радиотехнический расчет и проектирование). М., «Сов. радио», 1974, 240 с.
2. Перспективные радиопрозрачные керамические материалы для ракетной и космической техники / [Г.В. Лисачук, Р.В. Кривонок, А.В. Захаров и др.] // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 28 (1071). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 72–79.
3. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in $\text{SrO--Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ / [G. Lisachuk, R. Kryvobok, A. Zakharov et. al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 1(6). – Р. 10–15.
4. Sung Y.-M. Mechanical properties of off-stoichiometric celsian glass-ceramics / Y.-M. Sung // Journal of Materials Science Letters. – 1999. – Vol 18, Is-sue 15. – Р. 1229–1232
5. R.A. McCauley, Polymorphism and dielectric electric properties of Ba- and Sr-containing feldspars, J. Mater. Sci., № 35, p. 3939–3942, 2000.
6. Y.-M. Sung, S. Kim, Mechanical properties of off-stoichiometric $\text{BaO--Al}_2\text{O}_3\text{--}2\text{SiO}_2$ glass-ceramics, J. Mater. Sci., № 18, p. 1657–1660, 1999.
7. L. Zhien, H. Ying, Y. Jianjun, Study of the preparation process for $\text{BaO--Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ powders by a two-step method, J. Mater. Sci., № 30, p. 405–409, 1995.
8. Пат. 5695725 США, Int. Cl.6 B 64 C 1/10. Metod of preparing monoclinic $\text{BaO--Al}_2\text{O}_3\text{--}2\text{SiO}_2$ / Inna G. Talmy, Deborah A. Haught; заявник та патентоутримувач The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. – заяв. 18.07.1989; опубл. 09.12.1997. – 4 с.
9. Шестаков И. Я. Использование фторсодержащих минерализаторов в силикатных системах [Текст] / И. Я. Шестаков, Э. М. Никифорова, Р. Г. Еромасов, Т. В. Ступко, О. В. Раева, // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – С. 235 – 243.
10. Martel, L. C. System System $\text{Li}_2\text{SnO}_3\text{--Li}_2\text{O}$. 1:1 = Li_2SnO_3 ; 4:1 = Li_4SnO_6 ; composite [Електронний ресурс] : Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems NIST Standart Reference Database 31 vol. 01 / L. C. Martel, R. S. Roth – fig. 09191, 1981 – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM) : кольор. ; 12 см. – (ACerS-NIST Phase

Equilibria Diagrams CD-ROM Database v. 3.1.0, 2006). – Систем. вимоги : 128 Mb RAM ; 200 Mb available HDD ; CD-ROM Windows 98/Me/2000/NT/XP. – Назва з титул. екрану.

11. Особливості синтезу радіопрозорих керамік із заданими радіофізичними властивостями / [Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, О.Ю. Федоренко та ін.] // 36. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А.С. БЕРЕЖНОГО». – 2014. – № 114. – С. 133 – 144. –Бібліогр.: назв. – ISSN 2225-7748.
12. Технология эмали и защитных покрытий : учебное пособие / Л.Л. Брагина [и др.]; ред.: Л.Л. Брагина, А.П. Зубехин; Харьковский политехнический ин-т, нац. техн. ун-т, ЮРГТУ (НПИ). – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003.

References (transliterated)

1. V.A. Kaplun. Obtekateli antenn SVCH (radiotekhnicheskii raschet i proektirovaniye). M., «Sov. radio», 1974, 240 s.
2. Perspektivnyye radioprozrachnyye keramicheskiye materialy dlya raketnoy i kosmicheskoy tekhniki / [G.V. Lisachuk, R.V. Krivobok, A.V. Zakharov i dr.] // Visnik NTU «KHPi». – 2014. – № 28 (1071). – (Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia). – S. 72–79.
3. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ / [G. Lisachuk, R. Kryvobok, A. Zakharov et. al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 1(6). – P. 10–15.
4. Sung Y.-M. Mechanical properties of off-stoichiometric celsian glass-ceramics / Y.-M. Sung // Journal of Materials Science Letters. – 1999. – Vol 18, Is-sue 15. – P. 1229–1232
5. R.A. McCauley, Polymorphism and dielectric electric properties of Ba- and Sr-containing feldspars, J. Mater. Sci., № 35, p. 3939–3942, 2000.
6. Y.-M. Sung, S. Kim, Mechanical properties of off-stoichiometric $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$ glass-ceramics, J. Mater. Sci., № 18, p. 1657–1660, 1999.
7. L. Zhien, H. Ying, Y. Jianjun, Study of the preparation process for

$\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ powders by a two-step method, J. Mater. Sci., № 30, p. 405–409, 1995.

8. Pat. 5695725 CIIA, Int. Cl.6 B 64 C 1/10. Metod of preparing monoclinic $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$ / Inna G. Talmy, Deborah A. Haught; zaiavnyk ta patentoutrymuvach The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. – zaiav. 18.07.1989; opubl. 09.12.1997. – 4 c.
9. Shestakov I. YA. Ispol'zovaniye ftorsoderzhashchikh mineralizatorov v silikatnykh sistemakh [Tekst] / I. YA. Shestakov, E. M. Nikiforova, R. G. Yeromasov, T. V. Stupko, O. V. Rayeva, // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 1. – S. 235 – 243.
10. Martel, L. C. System System $\text{Li}_2\text{SnO}_3\text{-Li}_2\text{O}$. 1:1 = Li_2SnO_3 ; 4:1 = Li_8SnO_6 ; composite [Elektronnyy resurs] : Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems NIST Standart Reference Database 31 vol. 01 / L. C. Martel, R. S. Roth – fig. 09191, 1981 – 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM) : kol. or. ; 12 sm. – (ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams CD-ROM Database v. 3.1.0, 2006). – System. vymohy : 128 Mb RAM ; 200 Mb available HDD ; CD-ROM Windows 98/Me/2000/NT/XP. – Nazva z tytul. ekranu.
11. Osoblyvosti syntezu radioprozoroyi keramiky iz zadanymy radiofizychnymy vlastyvostyamy / [H.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, O.YU. Fedorenko ta in.] // Zb. nauk. pr. PAT «UKRNDI VOHNETRYVIV IM. A.S. BEREZHNOHO». – 2014. – № 114. – S. 133 – 144. –Bibliogr.: nazv. – ISSN 2225-7748.
12. Tekhnologiya emali i zashchitnykh pokrytiy : uchebnoye posobiye / L.L. Bragina [i dr.]; red.: L.L. Bragina, A.P. Zubekhin; Khar'kovskiy politekhnicheskii in-t, nats. tekhn. un-t, YURGTU (NPI). – Khar'kov : NTU «KHPi», 2003.

Надійшла (received) 24.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лісачук Георгій Вікторович (Лисачук Георгий Викторович, Lisachuk Georgiy) – доктор технічних наук, професор, завідувач науково-дослідної частини НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7157-9115>; e-mail: lisachuk@kpi.kharkov.ua

Кривобок Руслан Вікторович (Кривобок Руслан Викторович, Kryvobok Ruslan) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заступник завідувача науково-дослідної частини НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: krivobok491@gmail.com

Захаров Артем Вячеславович (Захаров Артем Вячеславович, Zakharov Artem) – кандидат технічних наук, заступник завідувача науково-дослідної частини НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0120-8263>; e-mail: zakharovartem@gmail.com

Волощук Валентина Василівна (Волощук Валентина Васильевна, Voloshchuk Valentyna) – аспірант кафедри кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2120-3088>; e-mail: valenty93vol@gmail.com

Лісачук Лідія Миколаївна (Лисачук Лидия Николаевна, Lisachuk Lidiia) – доцент кафедри природничих наук НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; e-mail: lisachuk@kpi.kharkov.ua

Чефранов Євген Вікторович (Чефранов Евгений Викторович, Chefranov Yevhen) – аспірант кафедри кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7315-7285>; e-mail: eugene@chefranov.name