

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

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

У статті розглянуто вплив добавок на інтенсифікацію процесу спікання керамічних матеріалів на основі системи $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Враховуючи різні механізми взаємодії добавок з основною матрицею для досліджень було обрано модифікатори – MgO , Cr_2O_3 , ZrSiO_4 , TiO_2 та мінералізатори – CaCO_3 , B_2O_3 , MoO_3 , $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$. На підставі проведеного комплексу досліджень встановлено, що найбільш перспективним інтенсифікатором для процесу спікання цельзіану є евтектична добавка $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ у кількості 1 мас.% з наступними характеристиками: водопоглинання – 5,1 %, пористість – 13,4 %, уявна щільність – 2,62 г/см³. Результати рентгенофазового аналізу свідчать про повне протікання реакції синтезу цельзіану за температури синтезу 1200 °С, що є підтвердженням зниження температури синтезу фази на 100 °С. Отримана цельзіанова кераміка відповідає вимогам, що висуваються до радіопрозорих матеріалів, та може використовуватись для виготовлення окремих деталей в авіакосмічній промисловості.

Ключові слова: цельзіан, інтенсифікуючі добавки, водопоглинання, уявна щільність, відкрита пористість, рентгенофазовий аналіз, мікроструктура.

Вступ.

З точки зору експлуатаційних характеристик універсальним матеріалом для промисловості є технічна кераміка, яка має найбільш різноманітні за своїм складом, властивості та напрямки використання. В залежності від галузі використання розрізняють електротехнічну, радіотехнічну та конструкційну кераміку, а також деякі види спеціального призначення (п'єзо- та феромагнітна, оптично прозора, біокераміка тощо) [1]. В авіакосмічній промисловості найбільш поширеним є використання радіопрозорих керамічних матеріалів.

Найбільш перспективним напрямком створення радіопрозорої кераміки є використання трьох видів високотермостійких неорганічних матеріалів: кераміка на основі оксиду алюмінію (високоглиноземиста), ситали та кварцова кераміка. Ці матеріали мають досить малий тангенс кута втрат ($\text{tg}\delta < 0,001$), низькі показники діелектричних властивостей ($\epsilon < 10$) та високу стабільність показників властивостей при зміні робочих температур [2].

Кварцова кераміка характеризується високою термостійкістю, стабільністю діелектричних характеристик в широкому температурному інтервалі і хорошими термостійкими властивостями, проте має низьку механічну міцність на згин (45–50 МПа), низьку стійкість до пилової та дощової ерозії. Крім того, верхня границя інтервалу робочих температур не перевищує 1000 °С [3].

Основним недоліком усіх радіопрозорих ситалів, є технологічна складність і високі енерговитрати виробництва [4]. Технологія включає кілька високотемпературних операцій, зокрема скловаріння за температур 1600 – 1650 °С, розлив розплаву до форм (700 °С) та багатоступінчасту термообробку для забезпечення кристалізації цільових фаз (750 °С і 1250 °С), що стримує її широке використання.

Високоглиноземна кераміка має велику перевагу перед іншими матеріалами в плані

вогнетривкості та стабільності властивостей у широкому частотному та температурному діапазонах, що є важливим фактором для обтічників високошвидкісних ракет [5]. Температура зміни агрегатного стану для неї – 2050 °С, у той час як для ситалів вона становить 1200 – 1350 °С, для керамічних матеріалів на основі кварцового скла – не вище 1300 °С.

Керамічним способом можна отримувати склокристалічні матеріали із щільноспеченою та регульованою пористою структурою, а порошкова технологія в порівнянні з ситаловою забезпечує підвищену стабільність та відтворюваність фізико-хімічних властивостей матеріалів. Однак, не зважаючи на різноманіття результатів наукових розробок, виготовлення матеріалів на основі алюмосилікатних систем є енерговитратним процесом (температура випалу переважно перевищує 1300 °С [4, 6]).

На основі системи $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ отримують радіопрозорі керамічні матеріали кордієритового, цельзіанового та анортитового складу, які відповідно до вимог [7] володіють низькими діелектричними характеристиками (діелектрична проникність < 6 , тангенс кута діелектричних втрат $< 10^{-3}$). Таким вимогам відповідає одна з основних фаз системи $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ – цельзіан ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), температура плавлення якого складає 1740 °С, а початок активного утворення фази відбувається за температури обробки від 1300 °С.

Технологія одержання цельзіанової кераміки потребує високих температур спікання – 1400 °С з додатковою попередньою обробкою при 1300 °С [8]. Важливість напряму та самого дослідження полягає в забезпеченні низькотемпературного синтезу кристалічної фази цельзіану та отримання щільноспечених радіопрозорих керамічних матеріалів.

© Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., 2022

Аналіз літературних даних.

Під час вибору інтенсифікаторів процесів спікання та синтезу зазвичай враховують декілька факторів. По-перше, обрані добавки мають призводити до зниження температури синтезу основної фази. По-друге, за умови утворення склофази її кількість та властивості не повинні погіршувати основні властивості кінцевого матеріалу – діелектричну проникність та тангенс кута діелектричних втрат. Також при дотриманні перших двох пунктів синтез фази має відбутися повністю без утворення додаткових фаз.

При синтезі певних кристалічних фаз підхід до механізмів дії мікродобавок в першу чергу залежить від механізму, за яким відбуваються реакції утворення даних фаз, а саме твердофазний або рідкофазний синтез. Тому й добавки в різних випадках можуть вести себе по різному, особливо в багатокомпонентних системах. Добавки, що не мають евтектик зі складовими синтезу і впливають на кристалізацію (розміри, сингонію, температуру початку реакції тощо) називають модифікаторами. Добавки, що впливають на синтез шляхом утворення розплаву та склофази, відповідають за його активність та геологічні властивості є мінералізаторами.

Для прискорення реакції синтезу фази цельзіану та зниження температури дослідники [8] в невеликих кількостях вводили добавки CaCO_3 та ашарит $2 \text{MgO} \times \text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$, які сприяли кристалізації моноклінної модифікації цельзіану. Однак синтез фази супроводжувався великою вогневою усадкою внаслідок дисоціації BaCO_3 . Американськими вченими в роботі [9], в якості інтенсифікаторів, які сприяють синтезу цельзіанової фази розглядалося використання ZrSiO_4 , V_2O_5 та Cr_2O_3 . Обрані добавки також сприяли синтезу цельзіану моноклінної сингонії.

Науковцями [10] досліджено вплив комплексних інтенсифікаторів на спікання славсонітової кераміки. В роботі показано позитивний вплив добавки $\text{SnO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ на низькотемпературну активацію процесу синтезу стронцієвого анориту і отримання щільноспеченого керамічного матеріалу, що через близьку схожість атомів барію та стронцію дає можливість її застосування під час синтезу цельзіанової фази.

З урахуванням всіх розглянутих факторів у даній роботі було обрано ряд добавок, що діють за різними механізмами, а саме: MgO , Cr_2O_3 , ZrSiO_4 та TiO_2 , які можна віднести до групи модифікаторів, так як вони мають температуру плавлення вищу за температуру плавлення цельзіану, а CaCO_3 , V_2O_5 , MoO_3 та $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ з температурою плавлення до 900°C відносяться в даному випадку до групи мінералізаторів.

Метою даного дослідження є знаходження оптимальної добавки та її кількості для отримання щільноспечених керамічних матеріалів на основі цельзіану за низької температури випалу.

Експериментальна частина

Для проведення досліджень був обраний стехіометричний склад цельзіану (мас. %: BaO – 40,85; Al_2O_3 – 27,17; SiO_2 – 31,98), який за рівнем електрофізичних властивостей задовольняє вимоги до радіопрозорих матеріалів.

Для синтезу обраної фази використовували наступні сировинні матеріали: карбонат барію, кварцовий пісок та глинозем марки Г-00.

Зразки для досліджень виготовляли за двохстадійною керамічною технологією. Першою стадією є синтез цельзіану. В лабораторних умовах для отримання шихти сировинні матеріали перемішували шляхом трикратного пропускання крізь сито № 015 з додаванням обраних добавок у концентрації 0,5, 1,0 та 2,0 мас. % понад 100 мас. % на суху речовину.

Формування дослідних зразків проводили шляхом пресування напівсухим способом на лабораторному гідравлічному пресі ПРГ-10 під тиском 20 МПа.

В якості тимчасової зв'язки використовували розчин КМЦ, загальна вологість маси для пресування складала 8 %.

Після сушки сформованих брикетів до залишкової вологості менше 1 % проводили синтез цельзіанової фази в лабораторній муфельній печі за температури 1200°C з витримкою 2 години та подальшим охолодженням разом із піччю.

На другій стадії помел синтезованого матеріалу проводили до повного проходження крізь сито № 0063. Потім з отриманого порошку готували шлікер з вологістю 30 % з додаванням 0,1 мас. % розріджувачої добавки Dolapix PC 67.

Для отримання сирцю шлікер заливали в просушені гіпсові форми. Випал зразків проводили в силітовій печі за температури 1350°C з 2-годинною витримкою.

Фазовий склад дослідних зразків визначали за допомогою методу рентгенофазового аналізу (РФА) із застосуванням дифрактометра ДРОН-3М з $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванням та нікелевим фільтром при стандартних умовах його роботи.

Вивчення мікроструктури дослідних зразків та морфології поверхні їх розломів здійснювали прямим методом растрової електронної мікроскопії з використанням скануючого електронного мікроскопа PhenomPro та прискорюючою напругою 15 кВ.

Основною ознакою, за якою можна оцінити вплив активуючих добавок на ступінь спікання керамічних матеріалів, є показник водопоглинання.

Іншою важливою властивістю є уявна щільність, яка дозволяє оцінити закриту пористість кінцевого виробу. Зазначені характеристики досліджували методом «швидкого вакуумування» відповідно до ISO 5017:2014.

Результати та обговорення

В лабораторних умовах визначалися фізичні властивості зразків для вивчення впливу обраних інтенсифікаторів та їх кількості на структуру цельзіанової кераміки.

Результати проведених досліджень наведено на рис. 1-3.

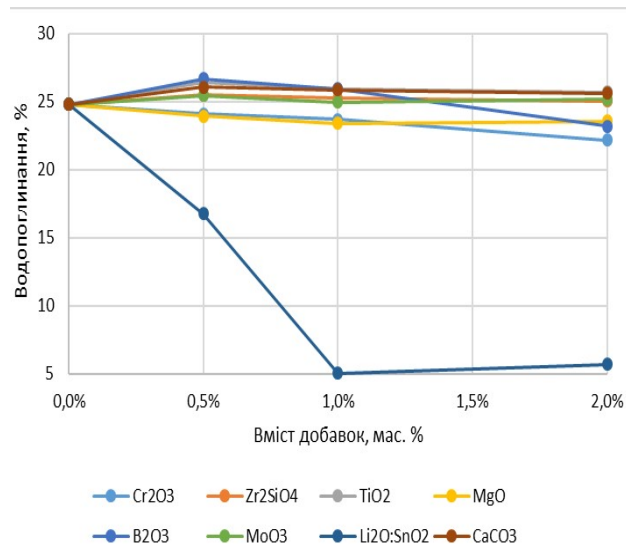


Рис. 1 – Залежність водопоглинання зразків цельзіану від концентрації інтенсифікаторів

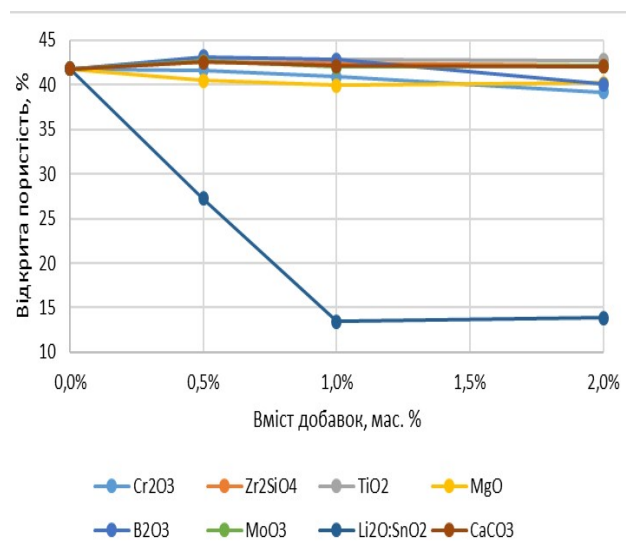


Рис. 2 – Залежність відкритої пористості зразків цельзіану від концентрації інтенсифікаторів

З наведених даних (рис. 1–3) бачимо, що фізичні властивості випалених зразків свідчать про різнобічний вплив досліджених добавок на цельзіанову кераміку.

Отримані результати свідчать про те, що найбільш перспективним інтенсифікатором для процесу спікання кераміки на основі цельзіану є евтектична добавка $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ у кількості 1 мас. %.

Дослідні зразки з додаванням цього активатора характеризувалися наступними показниками:

водопоглинання – 5,1 %,
пористість – 13,4 %,
уявна щільність – 2,62 г/см³.

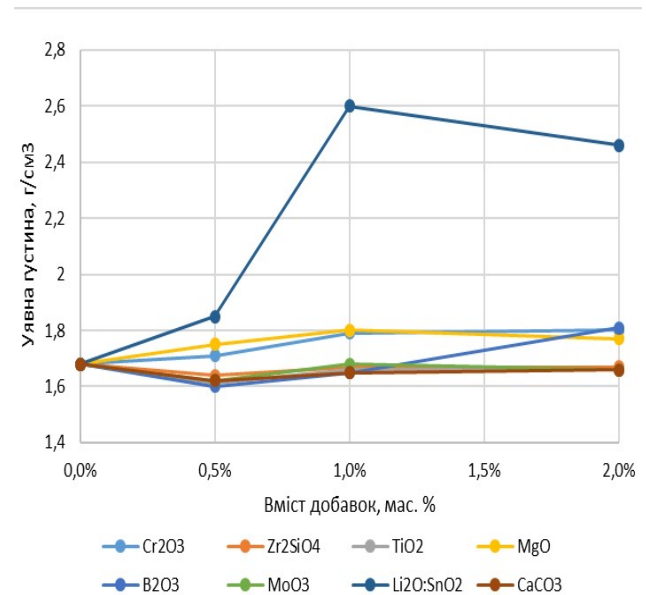


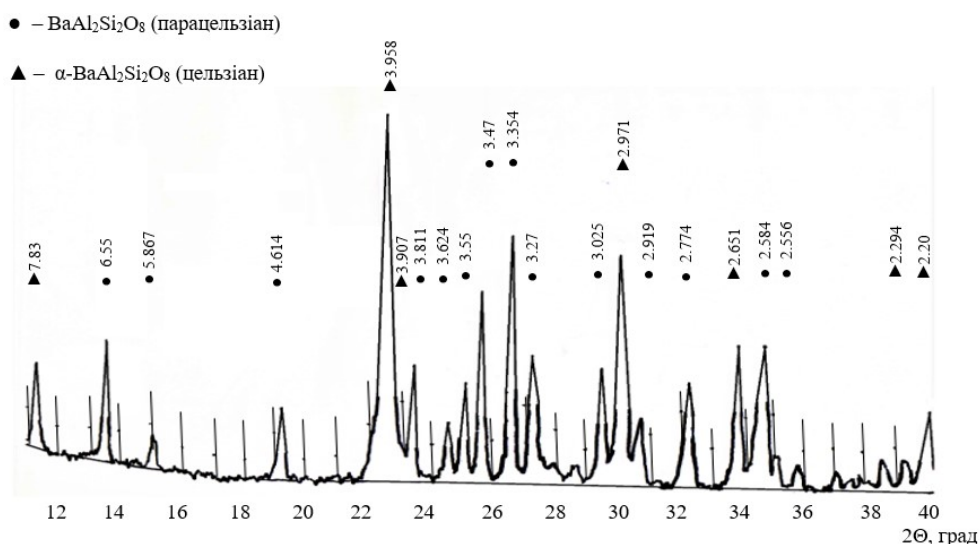
Рис. 3 – Залежність уявної щільності зразків цельзіану від концентрації інтенсифікаторів

В свою чергу додавання CaCO_3 , B_2O_3 , MoO_3 та TiO_2 призвело до збільшення пористості структури з 41,8 % без додавання добавки до 42,6 – 43,2 % в залежності від виду добавки, що негативно впливає на механічні властивості кінцевих виробів. Що стосується інших добавок, за температури синтезу 1200 °C та температури випалу 1350 °C з витримкою протягом 2 годин вони не мають істотного впливу на процес спікання цельзіанової кераміки.

Методом рентгеноструктурного аналізу на етапі синтезу було досліджено зразки з евтектичною добавкою $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ в кількості 1 мас. % на повноту реакцій формування фази цельзіану.

Результати рентгенофазового аналізу приведені на рис. 4.

Отримані дані свідчать про повне протікання реакції синтезу цельзіану, на рентгенограмі кристалічна фаза представлена в двох модифікаціях: α -цельзіан та парацельзіан. Також спостерігаємо відсутність карбонатів, що можуть надати додаткову вогневу усадку під час випалу та спровокувати появу дефектів у виробі.

Рис. 4 – Рентгенограма цельзіану, синтезованого за температури 1200 °C з додаванням 1 мас. % $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$

Структурні особливості зразка з кращими фізичними властивостями досліджували методом растрової електронної мікроскопії на етапі синтезу та після випалу зразків за температури 1350 °C. Мікрофотознімки зламів наведені на рис. 5 та рис. 6.

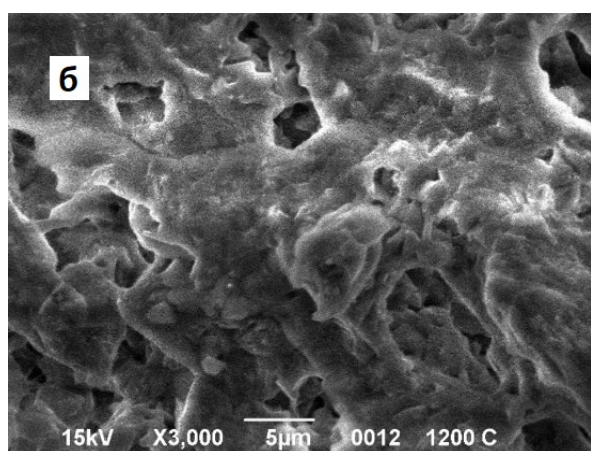
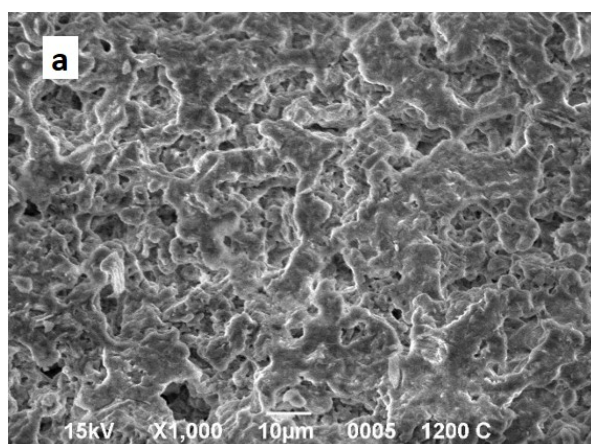


Рис. 5 – Мікроструктура зразків цельзіанової кераміки при витримці 2 години за температури 1200 °C зі збільшенням: а) x 1000; б) x3000

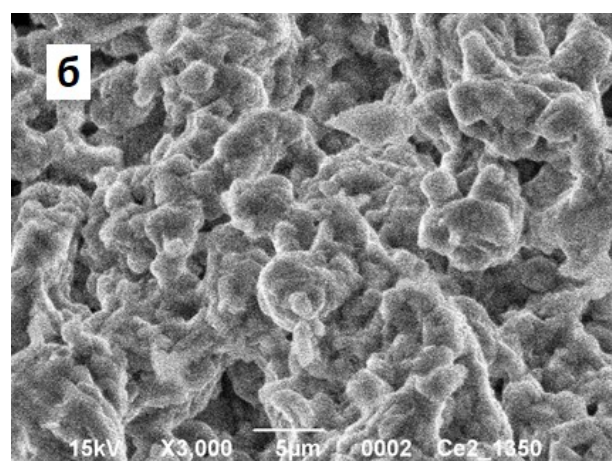
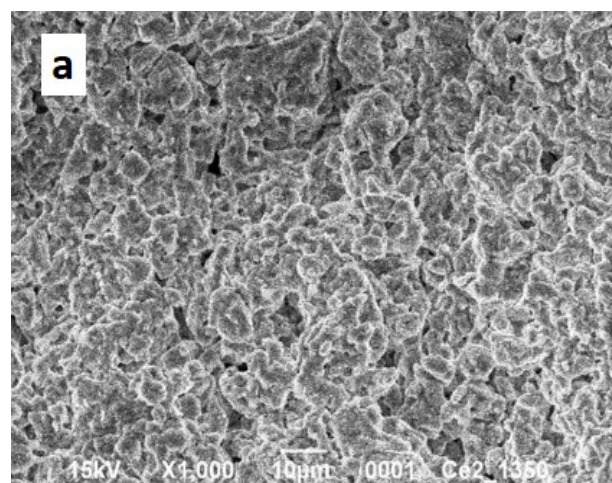


Рис. 6 – Мікроструктура зразків цельзіанової кераміки при витримці 2 години за температури 1350 °C зі збільшенням: а) x 1000; б) x3000

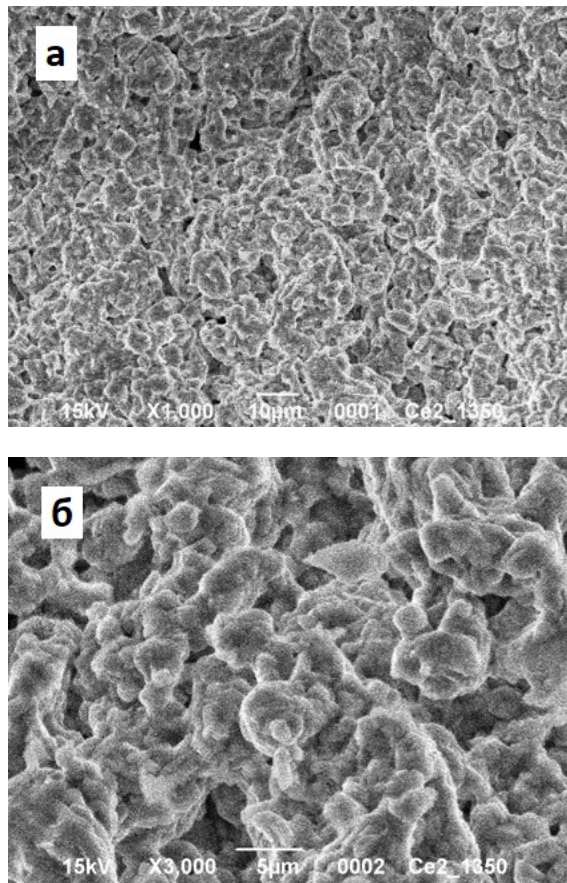


Рис. 6 – Мікроструктура зразків целезіанової кераміки при витримці 2 години за температури 1350 °C зі збільшенням: а) x 1000; б) x3000

На отриманих знімках (рис. 5, 6) бачимо, що структура як після синтезу так і після випалу є однорідною, без тріщин. Після випалу зразків за температури 1350 °C формується більш чітка структура, спостерігаємо ріст кристалів фази целезіану розміром 25–30 мкм із незначною кількістю закритих пор розміром 5–10 мкм, що підтверджує результати вимірювань фізичних властивостей. Загалом кристали целезіану в кераміці розподіляються рівномірно, а наявність пор можна пояснити коротким інтервалом ізотермічної витримки за максимальної температури та ймовірно швидким режимом випалу.

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

В результаті виконання роботи було досліджено вплив добавок на інтенсифікацію процесу спікання керамічних матеріалів на основі системи BaO – Al₂O₃ – SiO₂. З урахуванням розглянутих факторів для досліджень було обрано ряд добавок, що діють за різними механізмами: MgO, Cr₂O₃, ZrSiO₄ та TiO₂ (модифікатори) та CaCO₃, B₂O₃, MoO₃ та SnO₂ : Li₂O (мінералізатори).

Встановлено, що фізичні властивості випалених зразків свідчать про різнобічний вплив досліджених добавок на целезіанову кераміку. Найбільш

перспективним інтенсифікатором для процесу спікання целезіану є евтектична добавка SnO₂ : Li₂O у кількості 1 мас.% з наступними характеристиками: водопоглинання – 5,1 %, пористість – 13,4 %, уявна щільність – 2,62 г/см³.

Результати рентгенофазового аналізу свідчать про повне протікання реакції синтезу целезіану за температури синтезу 1200 °C, на рентгенограмі кристалічна фаза представлена в двох модифікаціях: α-целезіан та парацелезіан.

В свою чергу додавання CaCO₃, B₂O₃, MoO₃ та TiO₂ призвело до збільшення пористості структури з 41,4 % без додавання добавки до 42,6 – 43,2 % в залежності від виду добавки, що негативно впливає на механічні властивості кінцевих виробів. Що стосується інших добавок, істотного впливу на процес спікання целезіанової кераміки не виявлено.

Отримана целезіанова кераміка з додаванням 1 мас.% SnO₂ : Li₂O відповідає вимогам, що висуваються до радіопрозорих матеріалів, та може використовуватись для виготовлення окремих деталей в авіакосмічній промисловості.

Список літератури

1. Гузман И.Я. Химическая технология керамики: Учебное пособие для вузов / Гузман И.Я. – М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003.
2. Михеев, С. В. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике / С. В. Михеев, Г. Б. Строганов, А. Г. Ромашин. - М : Альтекс, 2002. - 275 с.
3. Holand W. Glass Ceramic Techology / W. Holand G. Beall // Amer. Cer. Soc. 2002. – 375 p.
4. Процессы спекания и кристаллизации при получении стронцийанортитовой стеклокерамики / П.Д. Саркисов, Л.А. Орлова, Н.В. Попович, Р. Брунч, А.С. Чайникова, К. Клинкамюллер, Н. Е. Щеголева // Стекло и керамика. 2012. – №8. – С. 14–16.
5. Scientific Grounds of Structural and Production Concepts to Provide Aircraft Life Time [Text]: Monography / V. O. Boguslayev, S. A. Bychkov, O. G. Grebenikov, M. I. Moskalenko, A. M. Gumennyi, E. T. Vasilevskiy, A. P. Eretin, O. D. Donets, V. F. Sementsov, V. O. Grebenikov, O. M. Stoliarchuk. – Kharkiv: Nat. Aerospace Univ. «KhAI», 2019. – 266 p.
6. Suzdal'tsev E.I., Kharitonov D.V. (2004) Intensified Sintering of Lithium Aluminosilicate Ceramics. Refractories and Industrial Ceramics. Vol. 45, № 2, pp. 88–90.
7. ГОСТ 20419-83. Материалы керамические электротехнические. Классификация и технические требования. – Введен 01.01.1985.
8. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учебное пособие для ВТУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
9. Пат. 5642868 США, Int. Cl.6 C 04 B 35/584. Ceramic material / Inna G. Talmy, Deborah A. Haught; заявитель и патентообладатель The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. – заявл. 2.05.1990; опубл. 1.06.1997. – 8 с.
10. Lisachuk, R. Kryvobok, A. Zakharov et al. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in SrO – Al₂O₃ – SiO₂. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 1(6). pp. 10–15.

Bibliography (transliterated)

1. Guzman I.Ja. Himicheskaja tehnologija keramiki: Uchebnoe posobie dlja vuzov / Guzman I.Ja. – M.: OOO RIF «Strojmaterialy», 2003.
2. Miheev, S. V. Keramicheskie i kompozicionnye materialy v aviacionnoj tehnike / S. V. Miheev, G. B. Stroganov, A. G. Romashin. – M : Al'teks, 2002. – 275 p.
3. Holand W. Glass Ceramic Techology / W. Holand G. Beall // Amer. Cer. Soc. 2002. – 375 p.
4. Processy spekanija i kristallizacii pri poluchenii stroncijanortitovoj steklokeramiki / P.D. Sarkisov, L.A. Orlova, N.V. Popovich, R. Brunch, A.S. Chajnikova, K. Klinkmjuller, N. E. Shhegoleva // Steklo i keramika. – 2012. – №8. – pp. 14–16.
5. Scientific Grounds of Structural and Production Concepts to Provide Aircraft Life Time [Text]: Monography / V. O. Boguslayev, S. A. Bychkov, O. G. Grebenikov, M. I. Moskalenko, A. M. Gumennyi, E. T. Vasilevskiy, A. P. Eretin, O. D. Donets, V. F. Sementsov, V. O. Grebenikov, O. M. Stoliarchuk. – Kharkiv: Nat. Aerospace Univ. «KhAI», 2019. – 266 p.
6. Suzdal'tsev E.I., Kharitonov D.V. (2004) Intensified Sintering of Lithium Aluminosilicate Ceramics. Refractories and Industrial Ceramics. Vol. 45, № 2, pp. 88–90
7. GOST 20419-83. Materialy keramicheskie jelektrotehnicheskie. Klassifikacija i tehnicheckie trebovanija. – Vveden 01.01.1985
8. Balkevich V.L. Tehnicheskaja keramika: uchebnoe posobie dlja VTUZov. 2-e izd., dop. – M.: Strojizdat, 1984. – 256 p.
9. Pat. 5642868 SShA, Int. Cl.6 C 04 B 35/584. Ceramic material / Inna G. Talmy, Deborah A. Haught; zajavitel' i patentoobladatel' The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. – zajavl. 2.05.1990; opubl. 1.06.1997. – 8 p.
10. G. Lisachuk, R. Kryvobok, A. Zakharov et al. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in SrO – Al₂O₃ – SiO₂. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 1(6). pp. 10–15.

Надійшла (received) 19.07.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лисачук Георгій Вікторович (Лисачук Георгий Викторович, Lisachuk Georgiy Viktorovich) – 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 Viktorovich) – 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

Волощук Валентина Василівна (Волощук Валентина Васильевна, Voloshchuk Valentyna Vasylivna) – аспірантка кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна;

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

G. V. LISACHUK, R. V. KRYVOBOK, V. V. VOLOSHCHUK
INTENSIFICATION OF THE SINTERING PROCESS OF CERAMIC MATERIALS BASED
ON THE BaO – Al₂O₃ – SiO₂ SYSTEM

The article examines the effect of additives on the intensification of the sintering process of ceramic materials based on the BaO – Al₂O₃ – SiO₂ system. Taking into account different mechanisms of interaction of additives with the main matrix, modifiers – MgO, Cr₂O₃, ZrSiO₄, TiO₂ and mineralizers – CaCO₃, B₂O₃, MoO₃, SnO₂ : Li₂O were selected for research. On the basis of the conducted complex of studies, it was established that the most promising intensifier for the celsian sintering process is the eutectic additive SnO₂ : Li₂O in the amount of 1 wt.% with the following characteristics: water absorption – 5.1%, porosity – 13.4%, apparent density – 2.62 g/cm³. The results of the X-ray phase analysis show that the celsian synthesis reaction is complete at a synthesis temperature of 1200 °C, which is a confirmation of a decrease in the synthesis temperature of the phase by 100 °C. The obtained celsian ceramics meet the requirements for radio-transparent materials and can be used for the manufacture of individual parts in the aerospace industry.

Key words: celsian, intensifying additives, water absorption, apparent density, open porosity, X-ray phase analysis, microstructure

Г. В. ЛИСАЧУК, Р. В. КРИВОБОК, В. В. ВОЛОЩУК
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
СИСТЕМЫ BaO – Al₂O₃ – SiO₂

В статье рассмотрено влияние добавок на интенсификацию процесса спекания керамических материалов на основе системы BaO – Al₂O₃ – SiO₂. Учитывая различные механизмы взаимодействия добавок с основной матрицей для исследований, были выбраны модификаторы – MgO, Cr₂O₃, ZrSiO₄, TiO₂ и минерализаторы – CaCO₃, B₂O₃, MoO₃, SnO₂ : Li₂O. На основании проведенного комплекса исследований установлено, что наиболее перспективным интенсификатором для процесса спекания целсиана является эвтектическая добавка SnO₂ : Li₂O в количестве 1 мас.% со следующими характеристиками: водопоглощение – 5,1 %, пористость – 13,4 %, мнимая плотность – 2,62 г/см³. Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о полном протекании реакции синтеза целсиана при температуре синтеза 1200 °C, что является подтверждением снижения температуры синтеза фазы на 100 °C. Полученная целсиановая керамика соответствует требованиям, предъявляемым к радиопрозрачным материалам, и может использоваться для изготовления отдельных деталей в авиакосмической промышленности.

Ключевые слова: целсиан, интенсифицирующие добавки, водопоглощение, мнимая плотность, открытая пористость, рентгенофазовый анализ, микроструктура.