

РАДІОПРОЗОРИ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ КОМПОЗИЦІЙ СИСТЕМИ

BaO–ZnO–Al₂O₃–SiO₂

Білогубкіна К.В., Федоренко О.Ю., Кривобок Р.В.

НТУ «Харківський політехнічний інститут», Харків

Зростання швидкості і маневреності літальних апаратів (ЛА), збільшення дальності ураження цілей вимагають підвищення ефективності захисту зовнішнього антенного обладнання та поліпшення функціональних характеристик обтічників. Вимоги до їх радіопрозорості виключають можливість використання більшості конструкційних матеріалів, зокрема металів. Як відомо, радіопрозорі матеріали (РПМ) практично не відбивають радіохвилі і відрізняються низькими діелектричними втратами ($\epsilon = 1 \div 10$; $\text{tg}\delta \leq 10^{-2}$ в інтервалі робочих температур [1]. Крім того, матеріали, які використовують при виготовленні обтічників, мають відповідати комплексу вимог за аеродинамічними, тепловими, термоциклічними та ерозійними навантаженнями [2].

Тому дослідження, спрямовані на розробку керамічних РПМ із заданими діелектричними характеристиками, теплофізичними і фізико-механічними властивостями є важливою задачею, вирішення якої сприятиме науково-технічному прогресу в галузях радіоелектроніки, електронної та аерокосмічної техніки.

Найбільш актуальною на сьогодні є створення РПМ на основі тугоплавких матеріалів. Натепер існує велика кількість розробок в галузі створення керамічних РПМ, але більшість з них не задовольняють вимоги щодо жаростійкості (наприклад кварцова кераміка), стійкості до окиснення в потоках газів, що містять кисень (кераміка на основі нітридів силіцію, бору, алюмінію, а також оксинітридна кераміка), наслідком чого є деградація цих матеріалів і нестабільність його діелектричних характеристик в робочому діапазоні температур [3].

Аналіз властивостей силікатів та алюмосилікатів показав, що синтез керамічних РПМ доцільно здійснювати на основі фаз віллеміту (Zn_2SiO_4), ганіту (ZnAl_2O_4), цельзіану ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), сподумену ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), кордієриту ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) та славсоніту ($\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), які володіють комплексом необхідних теплофізичних, діелектричних і механічних характеристик.

Метою даної роботи є отримання щільноспечених керамічних РПМ цельзіан-віллемітового складу на основі композицій системи BaO–ZnO–Al₂O₃–SiO₂. Задачі досліджень включали дослідження впливу алюмовмісної сировини на процеси утворення заданого комплексу фаз ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{Zn}_2\text{SiO}_4$), визначення умов отримання щільноспечених керамічних матеріалів, дослідження функціональних властивостей та структуро-фазових особливостей отриманих керамічних РПМ.

Як основа для синтезу жаростійких і міцних керамічних РПМ розглянута система BaO–ZnO–Al₂O₃–SiO₂, в якій кристалізуються сполуки віллеміту і цельзіану, що задовольняють вимоги до РПМ за показниками ϵ і

$\text{tg}\delta$ та характеризуються високою температурою плавлення (1512 і 1740°C відповідно) і відносно низьким тепловим розширенням (ТКЛР $3,2 \cdot 10^{-6}$ 1/К і $2,7 \cdot 10^{-6}$ 1/К відповідно).

Відповідно до задач досліджень розроблено маси з використанням металургійного глинозему Г-00, мікронізованого глинозему СТ3000SDP та гідроксиду алюмінію ГД-00 (зразки I₀, II₀, III₀ відповідно). Хімічний склад дослідних мас відповідає співвідношенню *цельзіан* : *вілеміт* = 1 : 1 при збереженні стехіометрії фаз. Для інтенсифікації спікання кераміки при температурі 1200 °С до складу мас вводили малі добавки (понад 100%), зокрема: 2 мас. % Li₂O (зразки I_L, II_L, III_L) або 1 мас. % добавки, склад якої відповідає евтектиці в системі Li₂O–SnO₂ (зразки I_E, II_E, III_E).

Зразки, формували напісухим пресуванням і піддавали двостадійному випалу при 1200°C. Дослідження показали, що продукти випалу характеризуються високим рівнем спікання (загальна поруватість 0,45-1,74%, уявна щільність 2800-3000 кг/м³). За електрофізичними властивостями ($\epsilon = 2,08-3,61$; $\text{tg}\delta=(2\div 8) \cdot 10^{-2}$) отримані матеріали задовільняють вимоги до РПМ щодо рівня діелектричних характеристик ($\epsilon = 1\div 10$, $\text{tg}\delta < 10^{-2}$). Встановлено, що при використанні гідроксиду алюмінію значення ϵ і $\text{tg}\delta$ є найнижчими. Визначення твердості зразків і межі міцності на стиск показали, що найвищий рівень властивостей спостерігається для зразків кераміки, отриманої з використанням металургійного глинозему (табл. 1).

Таблиця 1 – Властивості зразків радіо прозорої кераміки

Властивості	Шифр зразків								
	I ₀	I _L	I _E	II ₀	II _L	II _E	III ₀	III _L	III _E
Уявна щільність $\rho_k, \text{г/см}^3$	2,9 9	2,99	2,85	2,99	3,00	2,85	2,88	2,86	2,66
Водопоглинання W, %	0	0,31	0,17	0,18	0,46	0	0,6	0,51	0,35
Загальна пористість P _з , %	0	0,94	0,45	0,54	1,39	0	1,74	1,47	0,93
Діелектрична проникність, ϵ	2,8 5	2,41	3,34	3,11	2,33	3,61	2,46	2,08	3,85
Тангенс кута діелектричних втрат, $\text{tg}\delta$	0,07 55	0,02 42	0,03 94	0,04 38	0,05 99	0,08 14	0,00 91	0,07 44	0,063 4
Твердість за Rockwell, HRA	74	63	—*	72	71	—*	56	71	—*
Твердість за Vickers, HV	471	261	—*	435	403	—*	180	403	—*
Межа міцності на стиск $\sigma_{ст}$, МПа	152 0	831	—*	140 5	136 8	—*	610	136 8	—*
* зразки, що зазнали високотемпературної деформації									

Рентгенофазовими дослідженнями встановлено, що основними кристалічними фазами отриманих керамічних РПМ є вілеміт і цельзіан. Крім того наявні супутні фази ганіту, цинкового петаліту, алюмінату барію, кількість яких залежить від виду алюмовмісної сировини (рис. 1). Аналіз рентгенограм показав, що при використанні альтернативної алюмовмісної сировини (мікронізованого глинозему і гідроксиду алюмінію) інтенсивності рефлексів $\text{BaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_8$ і Zn_2SiO_4 збільшується навіть за відсутності добавок. Позитивний вплив добавки Li_2O позначається на збільшенні інтенсивності рефлексів основних фаз та зменшенні рефлексів цинкового петаліту та кварцу, а при введенні евтектичної добавки супутні фази відсутні.

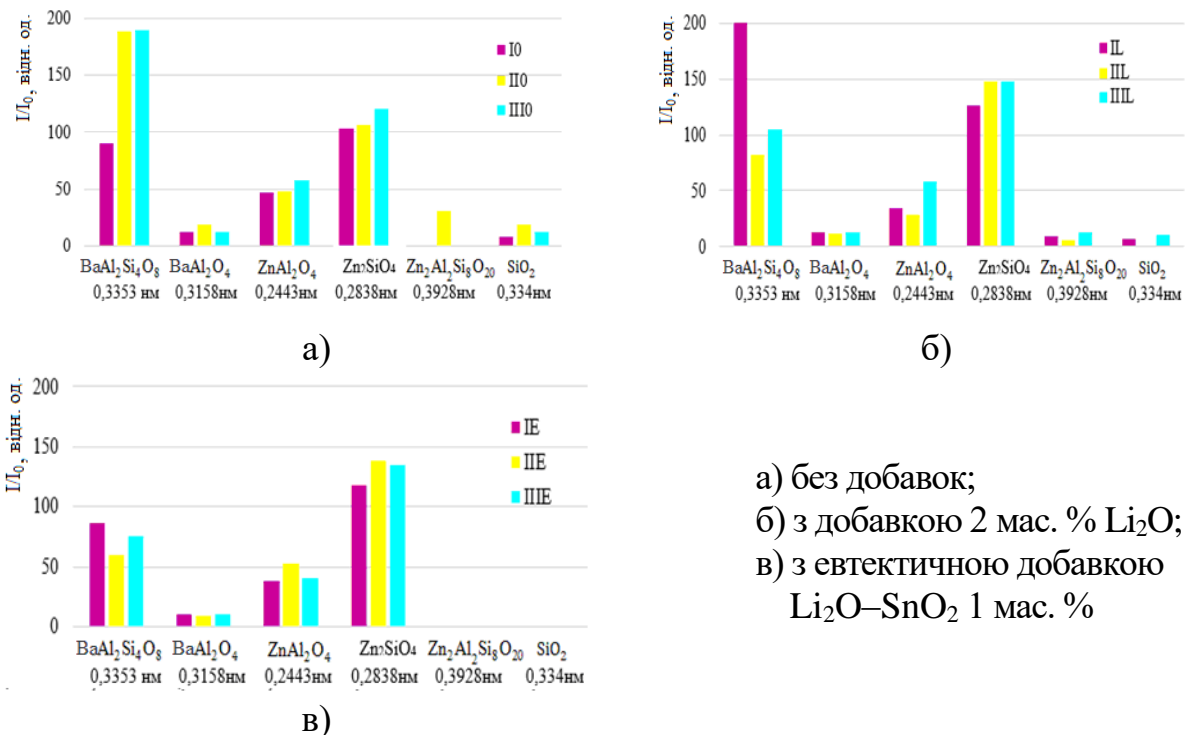
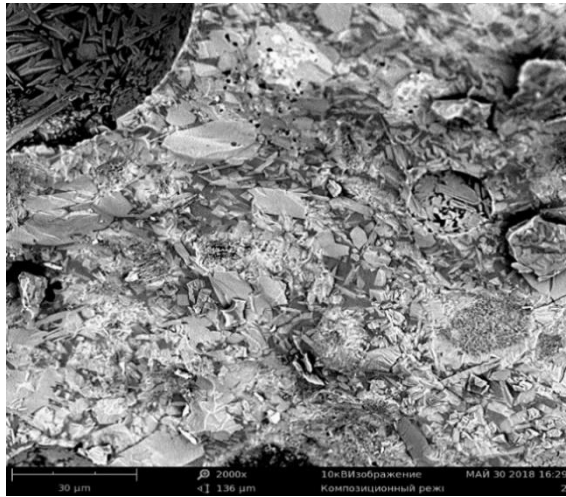
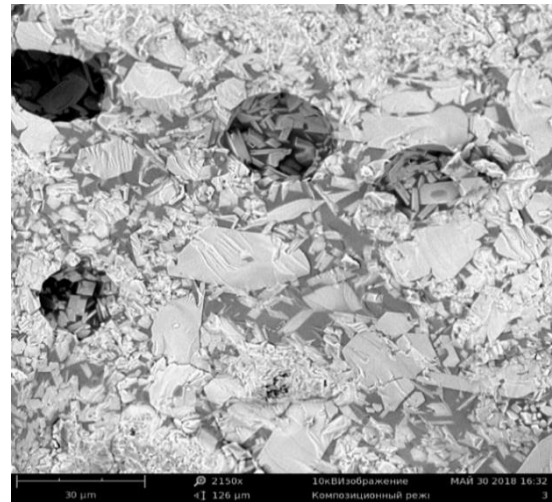


Рисунок 1 – Інтенсивність основних рефлексів кристалічних фаз в зразках радіопрозорої кераміки

Дослідженнями мікроструктури отриманих показали, що зразки мають кристалічну однорідну структуру в якій можна розрізнити голчасті кристали цельзіану $15,75 \times 0,55$ мкм та дрібнодисперсні кристали вілеміту $1,70 \times 1,14$ мкм. Останні заповнюють проміжках між крупними кристалами, що сприяє ущільненню матеріалу. В зразках, які не містять добавок, наявні сферичні пори з переважним розміром ~ 25 мкм. Введення малих добавок сприяє зменшенню розмірів пор майже вдвічі (до $\sim 17,6$ мкм в зразку I_L і до $\sim 13,2$ мкм в зразку I_E) та більш щільному розташуванню кристалів цельзіану та вілеміту внаслідок зміни їх кількісного співвідношення (для добавки Li_2O). Зразки кераміки I_E відрізняються більшою кількістю склофаз.



а)



б)

Рисунок 2 – SEM-знімки ($\times 2000$) зразків кераміки:

а) зразок I_L; б) зразок I_E

Таким чином в результаті проведених досліджень отримано щільноспечені керамічні РПМ цельзіан-віллемітового складу при зниженій температурі 1200°C. Введення до складу мас спікаючих добавок (2 мас.% Li₂O або 1 мас. % добавки, склад якої відповідає евтектиці в системі Li₂O–SnO₂) сприяє ущільненню структури за рахунок зменшення поруватості та більш компактного розташування кристалічних фаз за рахунок збільшення вмісту тонкодисперсних кристалів віллеміту.

Подальші дослідження розроблених керамічних РПМ цельзіан-віллемітового складу будуть спрямовані на визначення залежностей «склад – структура – функціональні властивості», включно з діелектричними характеристиками, термічною стійкістю та механічною міцністю.

1. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники / [Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Исаев Н.В. и др.] // Стекло и керамика. – 2012. – № 4. – С. 7–11.

2. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: a review / S. Bindra Narang, Bahel Shalini // Journal of Ceramic Processing Research. – 2010. – Vol. 11. – No. 3. – P. 316–321.

3. Суздальцев Е.И. Радиопрозрачные высокотермостойкие материалы XXI века // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – № 3. – С. 42–50.

4. Высокотемпературные радиопрозрачные керамические композиционные материалы для обтекателей антенн и других изделий авиационной техники (обзор) / Ивахненко Ю.А., Варрик Н.М., Максимов В.Г. // Труды ВИАМ. – 2016. – № 5 (41). – С. 36–43.