

УДК 666.651

*С.М. Логвінков^а, О.М. Борисенко^б, В.М. Шумейко^б, Н.П. Клочко^б, М.Ю. Івашченко^а,
А.М. Корогодська^б, Г.М. Шабанова^б, А.М. Іщенко^б, В.О. Ареф'єв^б*

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТИТАНАТІВ МАГНІЮ

^а Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна

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

Досліджено структуро-фазоутворення, мікроструктуру та електрофізичні властивості керамічних матеріалів системи MgO-TiO_2 , одержаних твердофазним синтезом із шихт, що відповідають стехіометрії MgTiO_3 та MgTi_2O_5 . Встановлено, що синтез MgTiO_3 (гейкеліту) відбувається через проміжне утворення MgTi_2O_5 (карроїту), яке супроводжується значним збільшенням об'єму. Це зумовлює формування гетерофазної, неповністю спеченої структури та обмежує досягнення високої щільності матеріалу за порівняно низькотемпературного режиму випалу (1300°C). Рентгеноструктурний аналіз підтвердив відсутність твердих розчинів і наявність фаз периклазу, рутилу, карроїту та гейкеліту залежно від складу шихти. За даними оптичної та електронної мікроскопії встановлено, що мікроструктура характеризується агрегатною будовою з ізометричними порами та нерівномірним розподілом фаз, що пов'язано з кінетичною обмеженістю процесів дифузії та впорядкування кристалічних ґраток. Дослідження електрофізичних характеристик у діапазоні частот 0,1–100 кГц показало зменшення електричної ємності, діелектричної проникності та тангенса діелектричних втрат зі зростанням частоти. За високих частот матеріали характеризуються низькими діелектричними втратами та значеннями діелектричної проникності, близькими до вимог до мікрохвильових діелектриків. Отримані результати підтверджують перспективність застосування матеріалів на основі магнієвих титанатів у виробництві конденсаторів, резонаторів і смугових фільтрів, а також доцільність подальшої оптимізації технологічних режимів для підвищення щільності та стабільності властивостей.

Ключові слова: система MgO-TiO_2 , гейкеліт, карроїт, твердофазний синтез, мікроструктура, діелектрична проникність, мікрохвильові діелектрики.

DOI: 10.32434/0321-4095-2026-167-4-58-69

Вступ

Сучасна електрокераміка знаходиться на новому витку розвитку завдяки розширенню запитів на матеріали з необхідними електрофізичними властивостями з боку виробників мікро- та нано-електроніки, а також розробників передових

електрохімічних пристроїв [1–4]. Титанати магнію є перспективними для формування фазового складу широкого асортименту матеріалів для таких цілей. У системі MgO-TiO_2 існує три стабільні сполуки [5–7]: Mg_2TiO_4 – ульвошпінель (кванділіт), MgTiO_3 – гейкеліт та MgTi_2O_5 –

© С.М. Логвінков, О.М. Борисенко, В.М. Шумейко, Н.П. Клочко, М.Ю. Івашченко, А.М. Корогодська, Г.М. Шабанова, А.М. Іщенко, В.О. Ареф'єв, 2026



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/>).

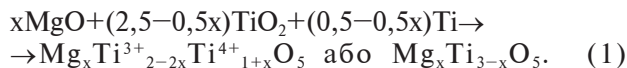
S.M. Logvinkov, O.M. Borysenko, V.M. Shumeiko, N.P. Klochko, M.Yu. Ivashchenko, A.M. Korohodskaya, H.M. Shabanova, A.M. Ishchenko, V.O. Arefiev

карроїт. Індивідуальні оксиди цієї системи є вже традиційними для електротехнічного застосування (діелектрики на основі периклазу (MgO), рутилова (TiO_2) кераміка для конденсаторів, сегнетокераміка на основі титанату барію BaTiO_3 , датчики парціального тиску кисню в газових сумішах на основі Магнелі-фаз (Magneli) – $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$, де $n=15-22$ та $n=29, 31$, – по суті, вони є кисневодефіцитним TiO_2 тощо).

Для вдосконалення різних пристроїв бездротових технологій зв'язку дедалі ширшого застосування набувають матеріали на основі MgTi_2O_5 (карроїту) та MgTiO_3 (гейкеліту) [8–11]. Причиною тому є придатні властивості та електрофізичні характеристики цих сполук, а також можливість їх варіювання в необхідних діапазонах значень при комбінуванні фазового складу матеріалів за участю інших сполук (табл. 1). Для конденсаторної кераміки найчастіше необхідно регулювати ϵ , α та TK_ϵ , а для мікрохвильових діелектриків – ϵ , τ_f і Q , що цілком досяжно при формуванні фазового складу на основі карроїту та гейкеліту. При цьому для мікрохвильових діелектриків (осцилятори, резонатори, смугові фільтри тощо) прагнуть забезпечити значення ϵ у межах 20–80, $\tau_f \approx 0$ та максимально високі значення Q , але не менше 1000 на надвисоких частотах.

Для електрохімічних пристроїв розробляють матеріали як на основі ульвошпінелі, так і на основі карроїту. Також анодні матеріали забезпечують змінність фазового складу за рахунок часткового відновлення в катіонній підґратці $\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow \text{Ti}^{3+}$ приблизно за 700°C та низького парціального тиску кисню в експлуатаційній газовій суміші. Процес виготовлення виробів із таких

матеріалів потребує особливих умов, зокрема [12]: 15-годинного випалу за температури 1470°C в атмосфері аргону або суміші H_2/N_2 (1:9) у запаяних молибденових трубках. Для зниження температури випалу та покращення процесу синтезу магнієвих титанатів застосовують оксидні добавки (зокрема Nb_2O_5), а також тонкодисперсні порошки титану:



Випал конденсаторної кераміки та мікрохвильових діелектриків також вимагає високих температур через мінімальну евтектику в системі $\text{MgO}-\text{TiO}_2$ за температури 1583°C між складами ульво шпінель–гейкеліт. Ця обставина стимулює пошук спікаючих добавок або застосування двоетапного випалу. Наприклад [8], синтез основної фази (MgTi_2O_5) забезпечують випалом брикету за 1500°C з ізотермічною витримкою при максимальній температурі 2 години, передбачаючи подальші технологічні операції: подрібнення, спільний вологий помел з 5–20% попередньо спеченого легкоплавкого скла (зокрема $\text{Li}_2\text{CO}_3:\text{B}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2=3:6:1$, 900°C , 1 година у платиновому тиглі), сушіння, пульверизацію, грануляцію, пресування таблеток ($\varnothing 8$ мм, $h=3$ мм) при 100 МПа і спікання виробів за $950-1050^\circ\text{C}$ (2 години). За цим способом для мікрохвильових діелектриків при 10% вмісті скла і випалі за 950°C (2 години) досягають: $\epsilon=19,5$; $\tau_f=16 \text{ мК}^{-1}$ та $Q=6800$. Подібний технологічний підхід застосування легкоплавких скляних сполук у зарубіжній літературі отримав спеціальну назву [9] – низь-

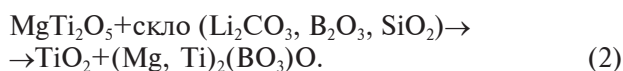
Таблиця 1

Електрофізичні характеристики*

Сполука, фаза	ϵ	$\alpha, \text{мК}^{-1}$	TK_ϵ		Q	$\tau_f, \text{мК}^{-1}$
			Реальна	Розрахункова		
Al_2O_3	10	8,5	+120	–85	33000 (10 ГГц)	50
MgO	10	13,5	+190	–135	–	–
TiO_2	100	7,5	–750	–750	17000 (3 ГГц)	400
SrTiO_3	230	10,3	–2400	–2370	–	–
CaTiO_3	170	10,8	–1600	–1836	1800	800
MgTiO_3	17	7	+100	–119	22000	–45
$\text{Mg}_{0,95}\text{Ca}_{0,05}\text{TiO}_3$	21	–	–	–	8000 (7 ГГц)	~ 0
$\text{BaNd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$	67	–	–	–	>1000 (6 ГГц)	4
MgTi_2O_5	15	–	–	–	47000	–66

Примітка: * – ϵ – діелектрична проникність; α – термічний коефіцієнт лінійного розширення (мК^{-1} – розмірність в англійській літературі, у вітчизняних публікаціях рівноцінна розмірність $10^{-6}/\text{K}$); TK_ϵ – температурний коефіцієнт зміни діелектричної проникності (відповідно, реальна чи виміряна, а також розрахункова $= -\alpha \cdot \epsilon$); Q – добротність, пропорційна добутку частоти (f) та температурного коефіцієнта зміни частоти (τ_f), що характеризує здатність діелектрика протидіяти дрейфу резонансної частоти під час змін температури.

котемпературна спільно випалена кераміка (LTCC) і дозволяє уникнути глибокої дифузії срібла в об'єм діелектрика при випіканні електродів, а також компонувати в одному виробі три активні компоненти: резистор, конденсатор і індуктор. При цьому легкоплавке скло дозволяє не тільки забезпечити щільноспечену структуру мікрохвильових діелектриків, але й модифікувати їх фазовий склад за рахунок взаємодії з основним сполуками, зокрема [8]:



Утворюваний за реакцією (2) рутил компенсує від'ємне значення τ_f для MgTi_2O_5 (табл. 1), наближаючи його до нуля і навіть роблячи додатним за 20% вмісту скла або за підвищення температури випалу.

Наведена інформація свідчить про актуальність і практичне значення досліджень структуро-фазоутворення матеріалів системи $\text{MgO}-\text{TiO}_2$, а також про вивчення їхніх діелектричних властивостей. Саме ці цілі ставилися в цій роботі.

Матеріали та методи досліджень

Вихідні матеріали для синтезу – MgO (Україна, марка JS-H6, вміст $\text{MgO} \geq 95\%$) та TiO_2 (Польща, кваліфікація ОСЧ, вміст TiO_2 99,65%) – після вагового дозування (ваги Constant brand, модель 14192-640с) піддавали спільному помелу з подальшим зволоженням шихти до 5% (8% розчин полівінілацетату в дистильованій воді), пресуванню при 120 МПа циліндричних зразків ($\varnothing 36$ мм) у металевій формі та випалу в печі зі швидкістю нагрівання $8^\circ\text{C}/\text{хв}$ до 1300°C (витримка 5 хв) з охолодженням разом із піччю.

Усадку, уявну щільність та межу міцності

випалених зразків визначали стандартними методами, прийнятими для вогнетривів і гармонізованими з європейськими нормами (EN). Для досліджень електрофізичних властивостей і вивчення структури матеріалу методом оптичної мікроскопії з випалених зразків алмазним інструментом нарізали диски товщиною від 3,5 до 7 мм. Рентгеноструктурний аналіз проводили на порошкових пробах ($<0,063$ мм), а для електронного аналізу мікроструктури матеріалів зразків (№ 1 – вихідний склад шихти відповідав стехіометрії гейкеліту, № 2 – карроїту) використовували уламки зразків після випробувань на межу міцності при стиску.

Електрофізичні властивості визначали на приладах ДЕ-5000 (3-затискачна схема) та Е7-22 (2-затискачна схема) в діапазоні частот 0,1–100 кГц. Застосовували оптичний (Bresser Science MTL-201) та електронний мікроскопи (Tescan Vega 3 LMN). Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі «Bruker» (Siemens, модель D 5000) з монохроматичним випромінюванням $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54060$ Å). Режими зйомки наведені в табл. 2, ідентифікацію фаз здійснювали з використанням рентгенографічної бази даних, що додається до дифрактометра, а також додаткової бази даних «American Mineralogist Crystal Structure Database».

Результати та обговорення

Дані рентгенофазового аналізу (РФА) на «Bruker» згруповані в табл. 3, 4, а дифрактограми матеріалів зразків наведено на рис. 1 і 2. Аналіз параметрів кристалічних ґраток основних фаз матеріалів зразків № 1 і № 2 (табл. 3) вказує на незначні їх відхилення від стандартних, що приводить до відповідних напружень через деформації ґраток (табл. 4). Звертає на себе увагу найбільш деформована кристалічна ґратка гейке-

Таблиця 2

Параметри рентгенофазового аналізу

Рентгенівське випромінювання	30 кВ, 20 мА	Швидкість сканування/тривалість	1,0000 град/хв
Гоніометр	Геометрія Брега-Брентано	Ширина кроку	0,0400 град
Приставка/додатковий модуль	–	Вісь сканування	2 Θ/Θ
Фільтр	немає	Діапазон сканування	5,0000–106,2800 град.
Щілина вибору СВО	ВВ	Щілина падаючого пучка	1/2 град
Монохроматор дифрагованого пучка	Фіксований монохроматор (U4)	Обмежувальна щілина за довжиною	–
Детектор	Сцинтиляційний лічильник	Приймальна щілина № 1	1/2 град
Режим сканування	Безперервний	Приймальна щілина № 21	0,45 мм

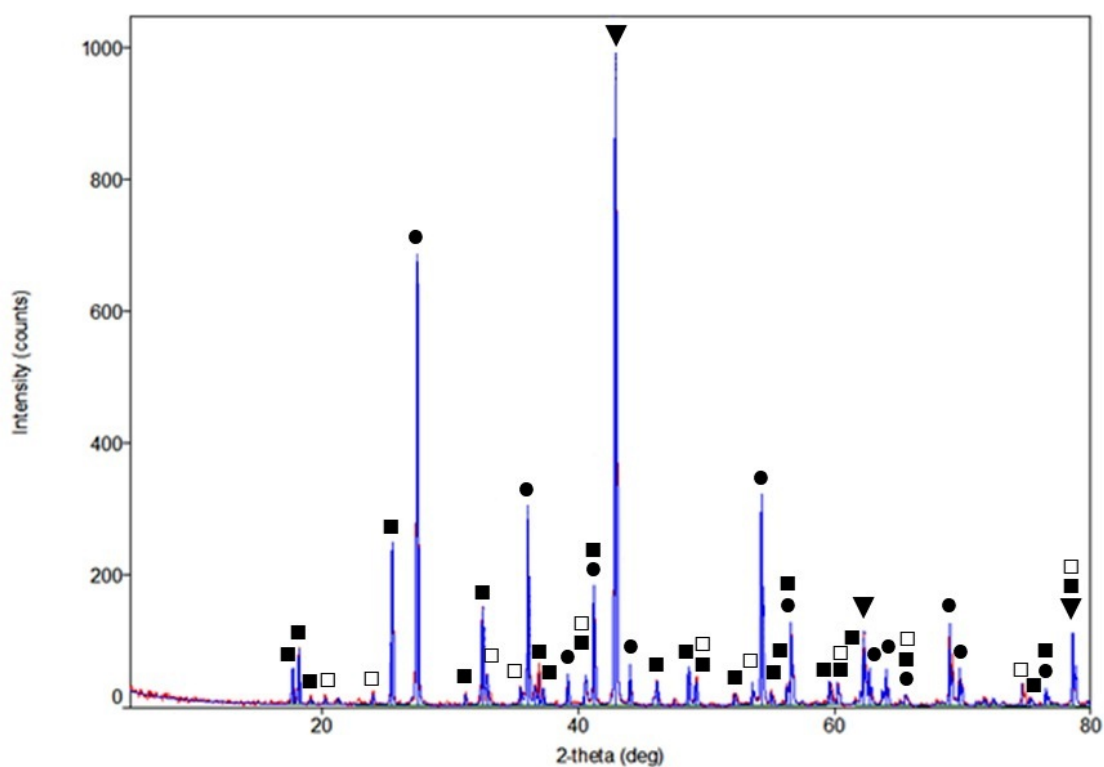


Рис. 1. Дифрактограма матеріалу зразка № 1: ▼—MgO; ●—TiO₂; ■—MgTi₂O₅; □—MgTiO₃.

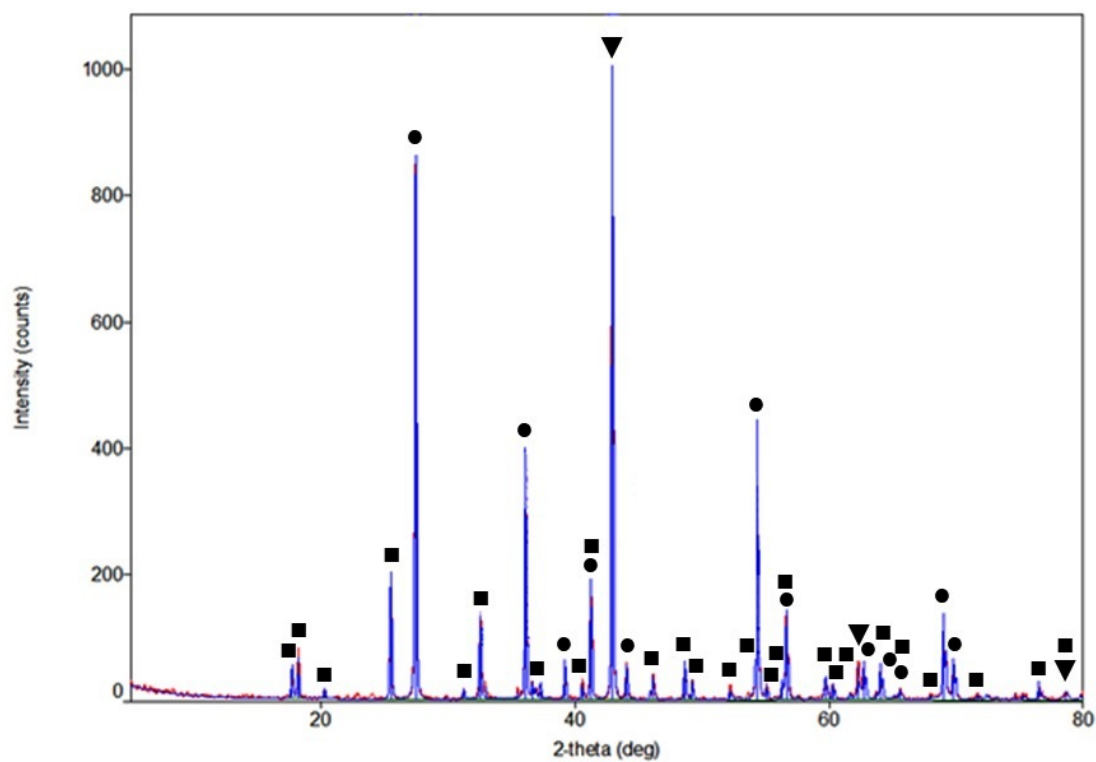


Рис. 2. Дифрактограма матеріалу зразка № 2: ▼—MgO; ●—TiO₂; ■—MgTi₂O₅.

літу, найменший розмір його кристалітів і мінімальна його кількість як синтезованого новоутворення, незважаючи на розрахункову стехіометрію вихідних компонентів шихти саме на склад MgTiO_3 . При цьому у фазовому складі матеріалу зразків № 2 проміжні продукти взаємодії відсутні, ідентифікується лише цільова фаза – карроїт (табл. 4), на відміну від матеріалу зразків № 1, де він є проміжною фазою. Ці обставини вказують на те, що первинним продуктом твердофазного синтезу в шихтах MgO-TiO_2 є MgTi_2O_5 – карроїт, який лише при подальшій взаємодії з периклазом утворює гейкеліт:



Ймовірною причиною цього є менш симетрична, псевдобрукітового типу кристалічна ґратка карроїту, структура якої простіше вибудовується на відміну від гексагонального гейкеліту. За інформацією [13] карроїт названо за регіоном «Каггоо» у Південній Африці, де вперше виявлено мінерал армаколіт ($\text{Mg}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Ti}_2\text{O}_5$) – магnezіально заміщений член твердих розчинів псевдобрукітового ряду « Fe_2TiO_5 (псевдобрукіт)– FeTi_2O_5 (залізистий псевдобрукіт)». По суті, карроїт є похідною сполукою при повному заміщенні магнієм заліза в FeTi_2O_5 , тобто магnezіальним псевдобрукітом із збереженням характерних елементів кристалічної ґратки. Специфічним є й факт відсутності деформації в кристалічній ґратці реліктового рутилу поряд із різким зростанням у

периклазі (табл. 4) для матеріалу зразка № 2, що вказує на напрям дифузійного масоперенесення катіонів титану в кристалічну ґратку периклазу. Водночас порівняно висока деформація кристалічної ґратки гейкеліту в матеріалі зразка № 1 пояснюється його складнішим механізмом утворення за реакцією (3) і відсутністю необхідних кінетичних умов (порівняно низька температура випалу та недостатня ізотермічна витримка) для досягнення високого ступеня впорядкування катіонів у гексагональну структуру. Зазначимо також, що в результатах РФА не відмічено жодних твердих розчинів у матеріалах зразків обох складів, що узгоджується із сучасними відомостями про субсолідусну будову системи MgO-TiO_2 . Останні дві обставини не сприяють набору міцності зразків № 1 і не забезпечують щільної структури матеріалу. Межа міцності при стисканні зразків № 1 становила лише 13 МПа, уявна густина $2,64 \text{ г/см}^3$, матеріал не дав усадки. При цьому для зразків № 2 аналогічні фізико-механічні властивості становлять 22 МПа, $2,9 \text{ г/см}^3$ і $4,7\%$ – усадка. Крім того, безусадковість матеріалу зразків № 1 зумовлена значним збільшенням об'єму під час перебігу реакції (3): $+36,5\%$, що розраховано за об'ємами кристалічних ґраток відповідних сполук (табл. 3). Такі значні об'ємні зміни призводять до розштовхування частинок під час синтезу гейкеліту, створюючи стеричні перешкоди процесу спікання за фактичної відсутності розплаву.

Результати РФА, отримані з використанням бази даних «American Mineralogist Crystal Structure

Таблиця 3

Параметри кристалічних ґраток*

Фази, формула	a, Å	b, Å	c, Å	V, Å ³
рутил, TiO_2	4,5937/4,5949	4,5937/4,5949	2,9598/2,9603	62,459/62,501
карроїт, MgTi_2O_5	9,740/9,740	9,999/10,0009	3,7419/3,7425	364,42/364,57
периклаз, MgO	2,9782/2,9781	2,9782/2,9781	2,9782/2,9781	26,415/26,412
гейкеліт, MgTiO_3	5,0563/–	5,0563/–	13,909/–	307,97/–

Примітка: * – чисельник – зразок № 1, знаменник – № 2; кути в кристалічних ґратках усіх фаз $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ за винятком гейкеліту ($\gamma=120^\circ$).

Таблиця 4

Характеристика фаз у складі матеріалів зразків*

Фази, формула	Група симетрії	Розмір кристалів, Å	Деформація решітки, %	Вміст, об. %
рутил, TiO_2	136: P42/mmm	681/655	0,03/0,00	31/47
карроїт, MgTi_2O_5	63: Bbmm	595/413	0,014/0,15	20/20
периклаз, MgO	229: Jm-3m	603/158	0,0427/0,44	42/33
гейкеліт, MgTiO_3	148: R-3, hexagonal	314/–	0,19/–	7/–

Примітка: * – чисельник – зразок № 1, знаменник – № 2.

Database», узгоджуються з вищеописаними (рис. 3). Лише для матеріалу зразків № 2 припускається можливе наявність слідів MgTiO_3 згідно з трьома дифракційними максимумами при значеннях подвійного Бреґівського кута (2θ , град.): 59,873; 78,732 і 89,626. При цьому всі три не є характеристичними та збігаються з аналогічними для карроїту, а 89,626 – додатково маскується близькими значеннями 2θ для рутилу. Відповідно, всі вищеописані результати РФА є достовірними та взаємно узгоджуються зі зробленими висновками.

Оптична мікроскопія підтверджує незавершеність процесів спікання та гетерофазність отриманих матеріалів. Внаслідок кінетичної затримки процесів структуро-фазоутворення на мікрофотографіях (рис. 4) спостерігаються (зразки № 1) частинки різного кольору, що формують як окремі агрегати, так і ділянки значних розмірів (до 6 мм у поперечнику, зокрема лівий верхній кут і лівіше центру на рис. 4а і 4б, відповідно). Світлі частинки частіше зустрічаються поодинокі і зрідка у вигляді протяжних скупчень (рис. 4б, правий верхній кут). Великі пори (>200 мкм) не характерні і спостерігаються поодинокі, наприклад, лівіше центру на рис. 4б та рис. 4в. Світлі частинки, найімовірніше, відносяться до карроїту, а темно-бурі, що зустрічаються поодинокі, можуть належати гейкеліту (центр на рис. 4б та нижче і лівіше центру на рис. 4в) або до привнесених домішок. Сірі частинки зі світлими та більш темними відтінками складають основну частину поля знімків (рис. 4г), порівняно рівномірно розподілені і, очевидно, належать до периклазу та

рутилу, що не прореагували.

Для матеріалу зразків № 2 результати оптичної мікроскопії в значній мірі схожі (рис. 5а–в). Великі пори також не характерні і частіше мають округлу форму (рис. 5б, правий верхній кут, рис. 5в, вище центру). Світлі частинки формують не лише протяжні агрегати, а й окремі ділнки до 1,5 мм у поперечному розмірі (в центрі ліворуч на рис. 5б).

Результати електронної мікроскопії узгоджуються з дослідженнями оптичною мікроскопією і доповнюють інформацію про характер мікроструктури досліджуваних матеріалів (рис. 6, 7). На мікрофотографії рис. 6а видно, що на краю поверхні зламу зразка № 1 структура матеріалу складається з пухких агрегатів сірих дрібнодисперсних частинок, які включають значну кількість ізометричних пор. Як матрична фаза з сірих частинок, так і пори різного розміру об'єднані в неперервний структурний каркас. Світлі частинки мають поодинокий характер і часто виступають у поровий простір, у вигляді агрегатів (до 20 мкм) зустрічаються рідше (наприклад, правіше та вище центру на рис. 6а). За вищої роздільної здатності (рис. 6б) видно, що світлі частинки зустрічаються в міжпорових перемичках та на виступаючих кутах і гранях сірих частинок, іноді формуючи звивисті протяжні зрощення (правий нижній кут рис. 6б). Світло-сірі частинки локалізовані у місцях контактів сірих частинок (переважно 2 мкм у поперечнику, рис. 6в).

Мікроструктура матеріалу зразків № 2 складається з більш щільних агрегатів темно- та світло-сірих частинок, які також включають поодинокі

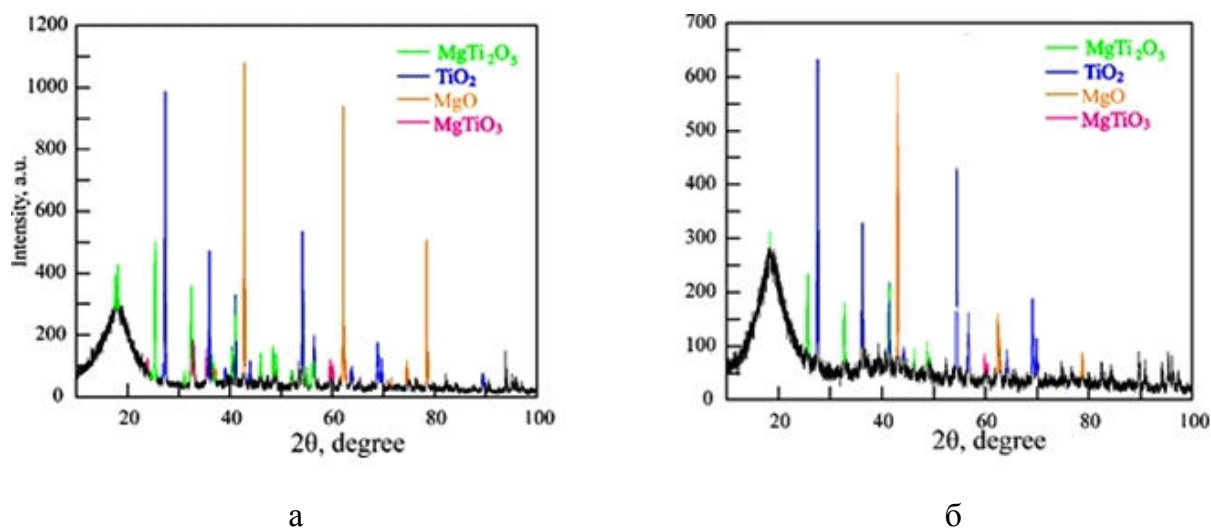


Рис. 3. Дифрактограми зразків № 1 (а) та № 2 (б), отримані з використанням бази даних «American Mineralogist Crystal Structure Database»

світлі частинки, що у вигляді скупчень зустрічаються зрідка (рис. 7а, правий верхній кут). Світлі частинки у формі звивистих агрегатів спостерігаються на периферії темно-сірих частинок (лівий верхній та правий нижній кути на рис. 7б). Пори мають переважний розмір 2 мкм, зрідка утворюючи злиття до 50 мкм у поперечнику (рис. 7в). Звивисті скупчення світлих частинок у формі гребеня мають протяжність близько 7 мкм і спостерігаються на скупченнях дрібних темно-сірих частинок (лівише та нижче центру рис. 7в).

Результати досліджень електрофізичних властивостей матеріалів на приладах ДЕ-5000 та Е7-22 показують хорошу збіжність значень ємності (C_p), тангенса діелектричних втрат ($\tan\delta$) та діелектричної проникності (ϵ) у діапазоні частот 0,12–1,0 кГц (табл. 5). Електрична ємність матеріалу зразків № 1 швидко зменшується у діапазоні частот 0,1–1,0 кГц (від 80,0 до 42,9 пФ), а

потім більш плавно, асимптотично, знижується до 24,4 пФ при 100 кГц. Для матеріалу зразків № 2 характер зміни C_p залежно від частоти аналогічний, але значення C_p нижчі (починаючи від 62,0 пФ при 0,1 кГц до 23,1 пФ при 100 кГц). Діелектричні втрати у матеріалах зразків № 1 і № 2 також мають спадний характер, проте особливо значне їх зменшення відзначається при більш високих частотах 10–100 кГц (табл. 5). При цьому на низьких частотах $\tan\delta$ більше для матеріалу зразків № 2, але на частотах 100 кГц значення $\tan\delta$ стає вдвічі меншим, ніж для матеріалу зразків № 1. Водночас обидва матеріали мають низькі діелектричні втрати при високих частотах (0,081 та 0,040 при 100 кГц для зразків № 1 і № 2, відповідно), що є типовим для кераміки на основі MgTiO_3 та MgTi_2O_5 .

Діелектрична проникність для матеріалу зразків № 2 монотонно знижується від 50,2 при

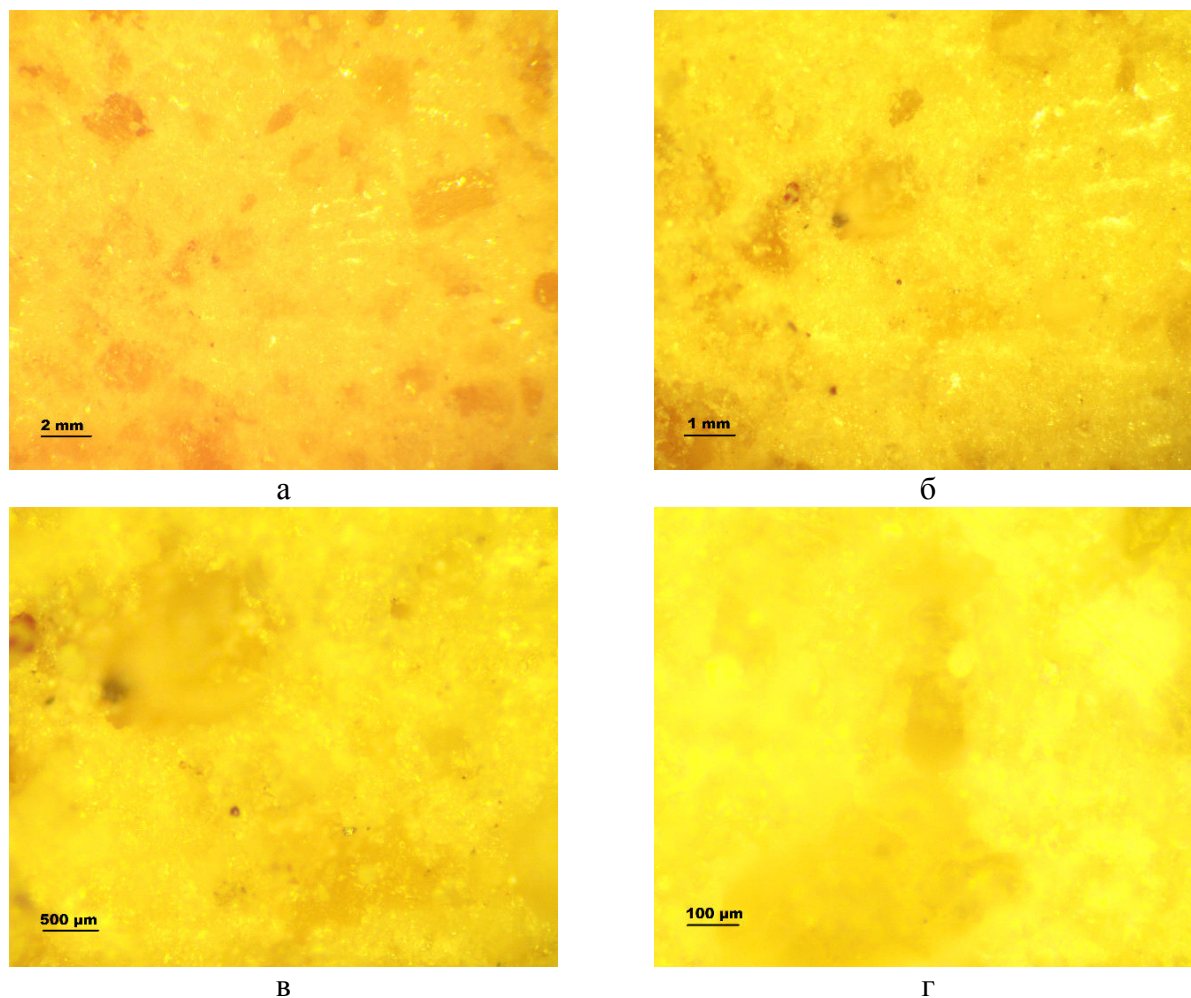


Рис. 4. Результати оптичної мікроскопії матеріалу зразків № 1

0,1 кГц до 18,2 при 100 кГц. Значення діелектричної проникності матеріалу зразків № 1 також зменшуються зі збільшенням частоти і є близькими до таких у матеріалу зразків № 2. Однак при 10 кГц значення $\varepsilon=29,7$ набуває характеру локального максимуму. Причина такої зміни залежності є від частоти не з'ясована і потребує додаткових досліджень. Загалом значення ε для матеріалу обох зразків при 100 кГц є близькими до необхідних для мікрохвильових діелектриків, що дозволяє визнати перспективність їх розроблення для подібної галузі застосування.

Висновки

Показано, що синтез MgTiO_3 із шихти рутилу та периклазу, які за складом відповідають стехіометрії гейкеліту, реалізується через проміжне утворення MgTi_2O_5 зі значним збільшенням об'єму. Ця обставина має принципове значення під час одержання щільної кераміки на основі

гейкеліту. Матеріали на основі магнієвих титанатів, отримані за порівняно низькотемпературного режиму випалу, є гетерофазними, не повністю спеченими та мають специфічну мікроструктуру, що може бути використано в подальших технологічних операціях одержання мікрохвильових керамічних діелектриків із застосуванням склозв'язок. Значення електричної ємності та діелектричної проникності отриманих матеріалів свідчать про їхню перспективність для виготовлення конденсаторів, резонаторів і смугових фільтрів.

Подяка

Дослідження здійснювалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту 2025.06/0063 «Технологія виготовлення термостабільної керамічної основи смугових фільтрів для систем сучасної радіокерованої техніки».

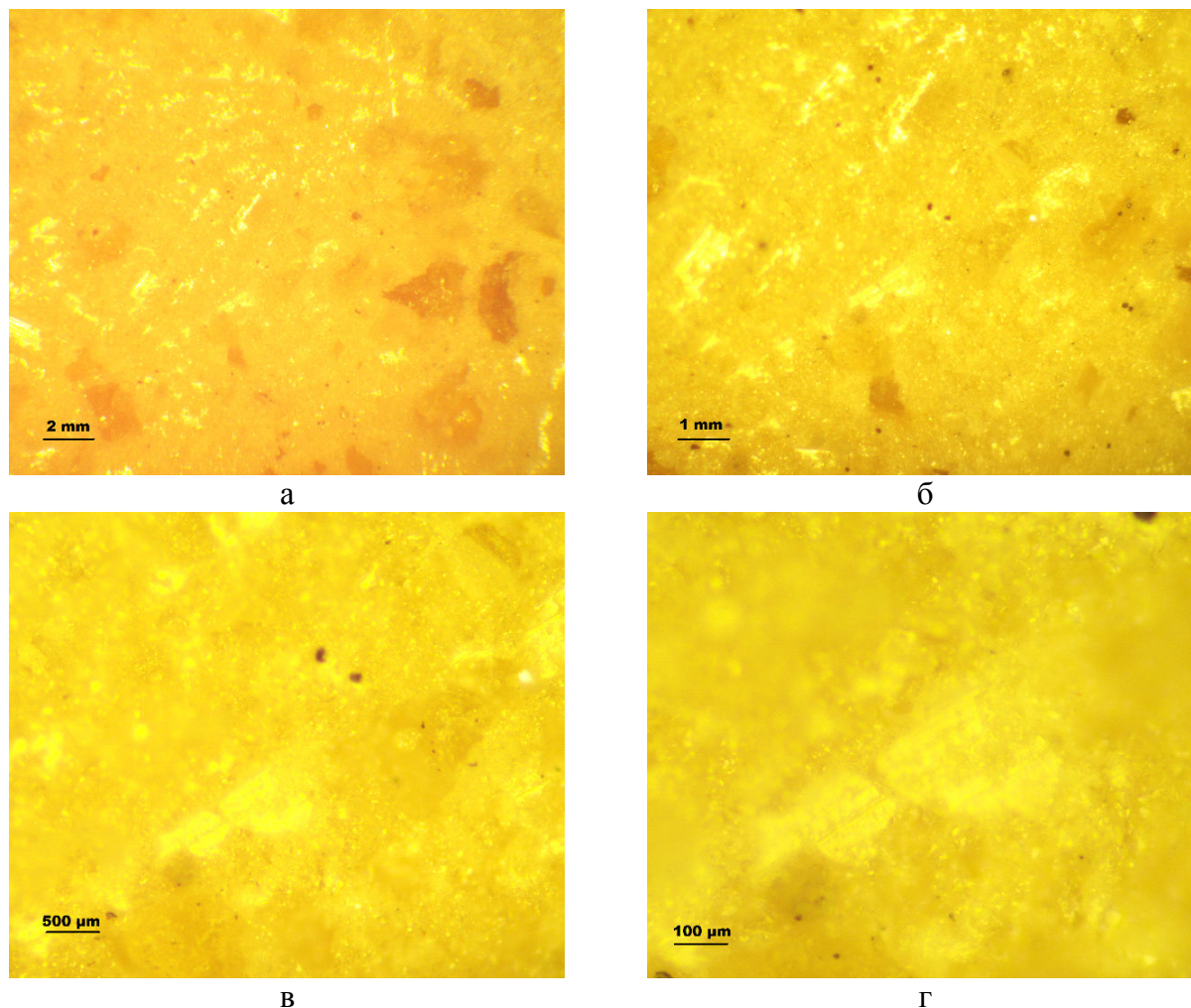


Рис. 5. Результати оптичної мікроскопії матеріалу зразків № 2

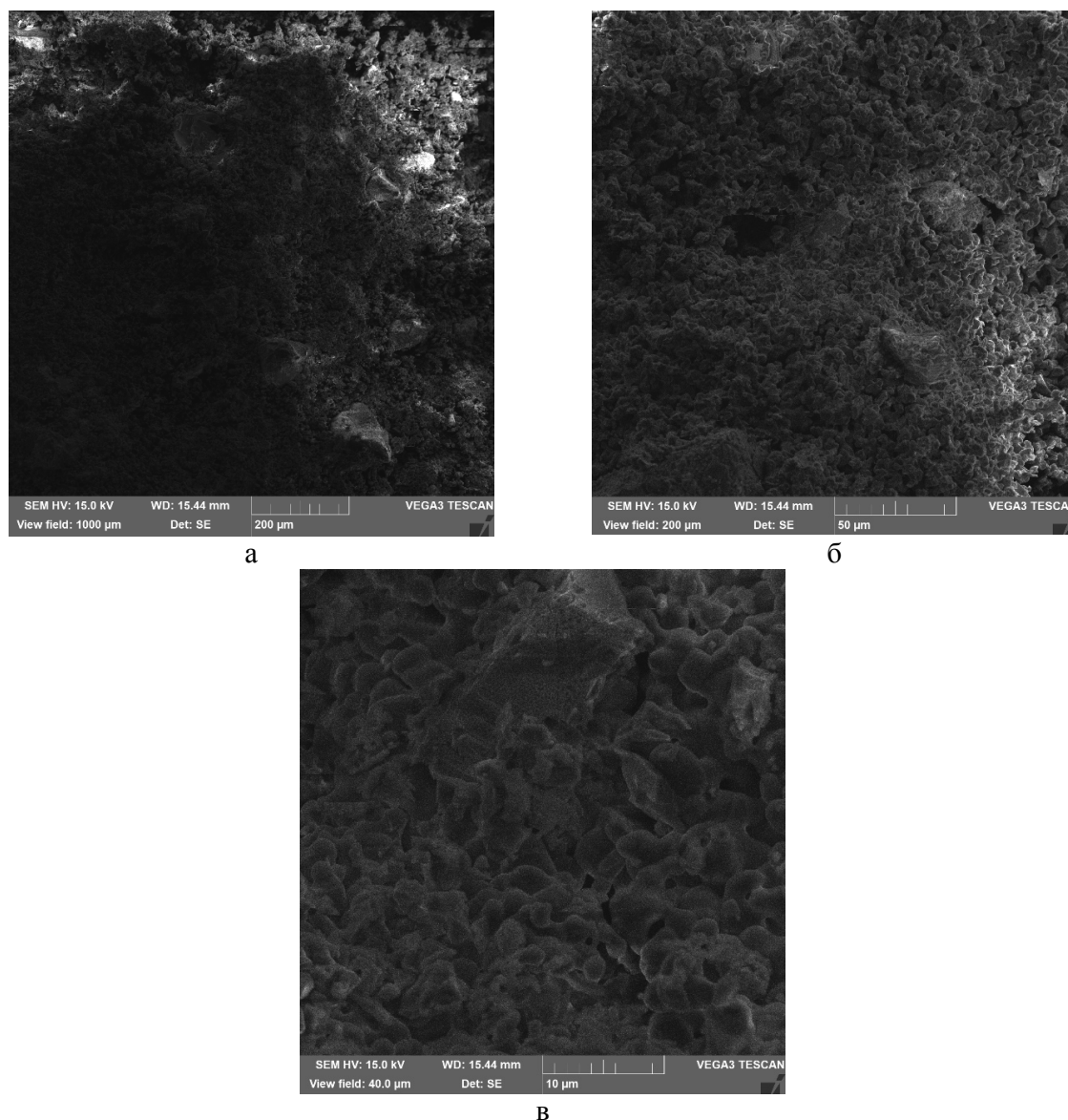


Рис. 6. Результати електронної мікроскопії матеріалу зразків № 1

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kui J.* Microwave dielectric ceramic materials and their industry development overview and future prospects // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2021. – Vol.1885. – Art. No. 032034.
2. *Development of high-performance single- and multiphase dielectrics for advanced microwave applications* / Belous A., V'yunov O., Kovalenko L., Khitrovskiy V., Godziszewski K., Yashchyshyn Y. // *Sci. Innov.* – 2025. – Vol.21. – No. 4. – P.21-36.
3. *Study on microwave dielectric materials an adjustable temperature drift coefficient and a high dielectric constant* / Chen Y.-B., Fan Y., Chang S.-H, Shen S. // *Ceramics.* – 2024. – Vol.7. – No. 3. – P.1227-1236.
4. *Krishna V.N., Padmasin K.G.* A review on microwave band pass filters: materials and design optimization techniques for wireless communication systems // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2023. – Vol.154. – Art. No. 107181.
5. *Experimental study of phase equilibria in the Al_2O_3 –MgO–TiO₂ system and thermodynamic assessment of the binary MgO–TiO₂ system* / Ilatovskaia M., Saenko I., Savinykh G., Fabrichnaya O. // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2018. – Vol.101. – No. 11. – P.5198-5218.
6. *Ilatovskaia M., Fabrichnaya O.* Thermodynamic assessment of the Al_2O_3 –MgO–TiO₂ system // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol.790. – P.1137-1148.
7. *Addition of TiO₂ and Ti₂O₃ to the Al_2O_3 –FeO–Fe₂O₃–MgO system* / Jantzen T., Hack K., Yazhenskikh E., Muller M. // *Calphad.* – 2018. – Vol.62. – P.187-200.

S.M. Logvinkov, O.M. Borysenko, V.M. Shumeiko, N.P. Klochko, M.Yu. Ivashchenko, A.M. Korohodska, H.M. Shabanova, A.M. Ishchenko, V.O. Arefiev

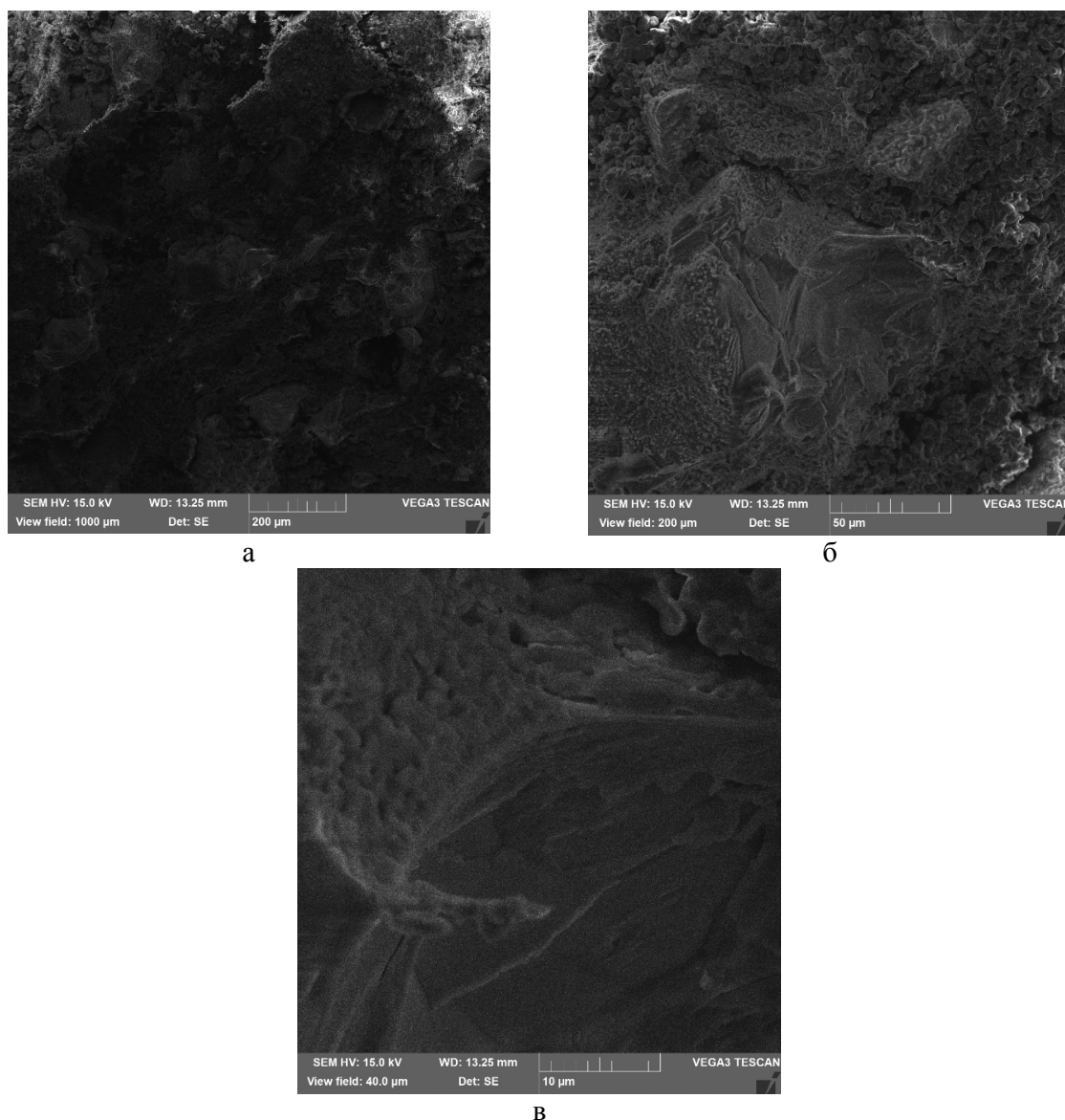


Рис. 7. Результати електронної мікроскопії матеріалу зразків № 2

8. *Phase evolution and dielectric properties of MgTi_2O_5 ceramic sintered with lithium borosilicate glass* / Shin H., Shin H.-K., Jung H.S., Cho S.-Y., Hong K.S. // *Mater. Res. Bull.* – 2005. – Vol.40. – No. 11. – P.2021-2028.

9. *Moulson A.J., Herbert J.M.* Electroceramics: materials, properties and applications. – New York: John Wiley & Sons Ltd., 2003. – 557 p.

10. *Thermodynamic modeling of $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ system* / Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. // 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2025. – P.1-4.

11. *Regulating the properties of dielectric materials in the $\text{MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ system* / Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova H., Arefiev V., Ishchenko A., Bykanov S. // 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology. – 2024. – P.1-4.

12. *Steiner H.-J., Middleton P.H., Steele B.C.H.* Ternary titanates as anode materials for solid oxide fuel cells // *J. Alloys Compd.* – 1993. – Vol.190. – No. 2. – P.279-285.

13. *Suzuki Y., Shinoda Y.* Magnesium dititanate (MgTi_2O_5) with pseudobrookite structure: a review // *Sci. Technol. Adv. Mater.* – 2011. – Vol.12. – No. 3. – Art. No. 034301.

Надійшла до редакції 25.03.2026

Надійшла після виправлення 23.06.2026

Прийнята до публікації 25.06.2026

Опублікована 10.08.2026

Таблиця 5

Електрофізичні властивості матеріалів

№ зразка	Властивості	Прибор	Частота, кГц				
			0,1	0,12	1,0	10	100
1	C_p , пФ	ДЕ-5000	80,0	74,0	42,9	29,7	24,4
		E7-22	–	73,0	40,1	–	–
	$\text{tg}\delta$	ДЕ-5000	0,637	0,615	0,389	0,200	0,081
		E7-22	–	0,600	0,385	–	–
	ϵ	ДЕ-5000	51,7	47,8	27,4	29,7	18,8
		E7-22	–	47,1	25,6	–	–
2	C_p , пФ	ДЕ-5000	62,0	56,0	34,0	25,9	23,1
		E7-22	–	55,0	31,0	–	–
	$\text{tg}\delta$	ДЕ-5000	0,748	0,698	0,331	0,134	0,040
		E7-22	–	0,67	0,31	–	–
	ϵ	ДЕ-5000	50,2	45,1	27,2	20,5	18,2
		E7-22	–	44,5	24,7	–	–

STRUCTURE FORMATION OF CERAMIC DIELECTRIC MATERIALS BASED ON MAGNESIUM TITANATES

S.M. Logvinkov ^a, O.M. Borysenko ^{b,*}, V.M. Shumeiko ^b,
N.P. Klochko ^b, M.Yu. Ivashchenko ^a, A.M. Korohodska ^b,
H.M. Shabanova ^b, A.M. Ishchenko ^b, V.O. Arefiev ^b

^a O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

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

* e-mail: onborisenko@ukr.net

The structural-phase formation, microstructure, and electrophysical properties of ceramic materials in the MgO–TiO₂ system, obtained by solid-state synthesis from batches corresponding to the stoichiometry of MgTiO₃ and MgTi₂O₅, were studied. It was found that the synthesis of MgTiO₃ (geikielite) occurs through the intermediate formation of MgTi₂O₅ (pseudobrookite), which is accompanied by a significant increase in volume. This leads to the formation of a heterophase, incompletely sintered structure and limits the achievement of high material density under a relatively low firing temperature (1300°C). X-ray diffraction analysis confirmed the absence of solid solutions and the presence of periclase, rutile, pseudobrookite, and geikielite phases depending on the batch composition. According to optical and electron microscopy data, the microstructure is characterized by an aggregate structure with isometric pores and an uneven phase distribution, which is associated with kinetic limitations of diffusion processes and crystal lattice ordering. Studies of electrophysical characteristics in the frequency range of 0.1–100 kHz showed a decrease in capacitance, dielectric permittivity, and dielectric loss tangent with increasing frequency. At high frequencies, the materials are characterized by low dielectric losses and dielectric permittivity values that meet the requirements for microwave dielectrics. The obtained results confirm the prospects for using magnesium titanate-based materials in the production of capacitors, resonators, and band-pass filters, as well as the advisability of further optimization of technological regimes to increase density and property stability.

Keywords: MgO–TiO₂ system; geikielite; pseudobrookite; solid-state synthesis; microstructure; dielectric permittivity; microwave dielectrics.

REFERENCES

1. Kui J. Microwave dielectric ceramic materials and their industry development overview and future prospects. *J Phys Conf Ser.* 2021; 1885: 032034. doi: 10.1088/1742-6596/1885/3/032034.
2. Belous A, V'yunov O, Kovalenko L, Khitrovskiy V, Godziszewski K, Yashchyshyn Y. Development of high-performance single- and multiphase dielectrics for advanced microwave applications. *Sci Innov.* 2025; 21(4): 21-36. doi: 10.15407/scine21.04.021.
3. Chen YB, Fan Y, Chang SH, Shen S. Study on microwave dielectric materials an adjustable temperature drift coefficient and a high dielectric constant. *Ceramics.* 2024; 7: 1227-1236. doi: 10.3390/ceramics7030081.
4. Krishna VN, Padmasin KG. A review on microwave band pass filters: materials and design optimization techniques for wireless communication systems. *Mater Sci Semicond Process.* 2023; 154: 107181. doi: 10.1016/j.mssp.2022.107181.
5. Ilatovskaia M, Saenko I, Savinykh G, Fabrichnaya O. Experimental study of phase equilibria in the Al₂O₃–MgO–TiO₂ system and thermodynamic assessment of the binary MgO–TiO₂ system. *J Am Ceram Soc.* 2018; 101(11): 5198-5218. doi: 10.1111/jace.15748.
6. Ilatovskaia M, Fabrichnaya O. Thermodynamic assessment of the Al₂O₃–MgO–TiO₂ system. *J Alloys Compd.* 2019; 790: 1137-1148. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.03.046.
7. Jantzen T, Hack K, Yazhenskikh E, Muller M. Addition of TiO₂ and Ti₂O₃ to the Al₂O₃–FeO–Fe₂O₃–MgO system. *Calphad.* 2018; 62: 187-200. doi: 10.1016/j.calphad.2018.05.009.
8. Shin H, Shin HK, Jung HS, Cho SY, Hong KS. Phase evolution and dielectric properties of MgTi₂O₅ ceramic sintered with lithium borosilicate glass. *Mater Res Bull.* 2005; 40: 2021-2028. doi: 10.1016/j.materresbull.2005.04.025.

S.M. Logvinkov, O.M. Borysenko, V.M. Shumeiko, N.P. Klochko, M.Yu. Ivashchenko, A.M. Korohodska, H.M. Shabanova, A.M. Ishchenko, V.O. Arefiev

9. Moulson AJ, Herbert JM. *Electroceramics: materials, properties and applications*. New York: John Wiley & Sons Ltd.; 2003. 557 p. doi: 10.1002/0470867965.

10. Borysenko O, Logvinkov S, Kryvobok R, Shabanova H, Korohodska A. Thermodynamic modeling of $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ system. *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2025: 1-4. doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288397.

11. Borysenko O, Logvinkov S, Shabanova H, Arefiev V, Ishchenko A, Bykanov S. Regulating the properties of dielectric materials in the $\text{MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ system. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology*. 2024: 1-4. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877946.

12. Steiner HJ, Middleton PH, Steele BCH. Ternary titanates as anode materials for solid oxide fuel cells. *J Alloys Compd.* 1993; 190: 279-285. doi: 10.1016/0925-8388(93)90412-G.

13. Suzuki Y, Shinoda Y. Magnesium dititanate (MgTi_2O_5) with pseudobrookite structure: a review. *Sci Technol Adv Mater.* 2011; 12(3): 034301. doi: 10.1088/1468-6996/12/3/034301.