

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій

Факультет харчових та хімічних технологій

(назва факультету)

Кафедра хімічної технології кераміки, скла та біомедичних матеріалів

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

До кваліфікаційної роботи

Бакалавр

На тему : Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії
кордієритової кераміки

За освітньою програмою бакалавр

Зі спеціальності: 161 хімічні технології та інженерія

Виконав : студент 4 курсу групи 4-ТС-53

_____/ Дмитро ПАЛЬКО /
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: _____ асист., PhD, Юлія КАЛІШЕНКО
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер: _____
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

_____	_____	_____
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	_____
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	_____
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	_____
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	_____
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Дніпро – 2026

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technology

Faculty of Food and Chemical Technologies

(faculty name)

Department of Chemical Technology of Ceramics, Glass and Biomedical Materials

(full name of the department)

Explanatory note

To Master`s Bachelor`s Thesis

Bachelor

On the topic: Development of compositions and study of properties of radiolucent cordierite ceramics.

according to educational curriculum

in the specialty: 161 chemical technology and engineering

Done by the student of the group: group 4-TS-53

Dmytro PALKO

(name, surname)

Scientific Supervisor:

Assistant, PhD Yuliia KALISHENKO,

(position, name, surname)

Normative controller:

(position, name, surname)

Supervisors Consultans

(chapter title heading)

(position, name, surname)

(chapter title heading)

(position, name, surname)

(chapter title heading)

(position, name, surname)

(chapter title heading)

(position, name, surname)

Міністерство освіти та науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: харчових та хімічних технологій

Кафедра: хімічної технології кераміки, скла та біомедичних матеріалів

Рівень вищої освіти: бакалавр

Освітня програма: хімічні технології та інженерія

Спеціальність: 161 хімічні технології та інженерія

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

Олександр ЗАЙЧУК

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

На кваліфікаційну роботу _____
бакалавр
(ступінь вищої освіти)

Студенту Пальку Дмитру Геннадійовичу
(Прізвище, Ім'я, По-батькові)

1.Тема роботи: Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорі кордієритової кераміки

Керівник роботи : Калішенко Юлія Русланівна, доктор філософії (PhD)
(Прізвище, Ім'я, По-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом від «___» _____ 202_р. № _____

2.Строк подання студентом роботи: 01.06.2026 р.

3.Вхідні дані до роботи: задані властивості матеріалів, евтектичне скло магнійалюмосилікатної системи та склади кордієритових матеріалів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):
Вступ. 1.Літературний огляд. 2. Експериментальна частина. 3. Охорона праці. Висновки. Перелік використаної літератури. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Слайди презентації -

6. Консультанти розділів роботи :

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв (підпис студента, дата)
Вступ	PhD, асистент каф. ХТКС та БМ Калішенко Ю.Р.		
Літературний огляд			
Експериментальна частина			
Охорона праці			
Оформлення розрахунково-пояснювальної записки			

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Вступ	11.05.2026 р.	
2.	Літературний огляд	14.05.2026 р.	
3.	Експериментальна частина	11.05.2026 р.	
4.	Охорона праці	24.05.2026 р.	
5.	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки	02.06.2026 р.	
	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри		
	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної системи		

Студент _____ Дмитро ПАЛЬКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи _____ Юлія КАЛІШЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ п/п	ФОРМАТ	ПОЗНАЧЕННЯ	НАЙМЕНУВАННЯ	КІЛ. АРКУШІВ	№ ЕКЗ-ПУ	ПРИМІТКА
1			ДОКУМЕНТАЦІЯ	80		
			ЗАГАЛЬНА			
			ЗАНОВО РОЗРОБЛЕНА			
	A4	4ТС53.026.161.001.ДР.ПЗ	ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
2	A4	4ТС53.026.161.001.ДР.ПЗ	ДІАГРАМА ТРИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$			
			ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД СКЛА	1		
3	A4	4ТС53.026.161.002.ДР.ПЗ	СХЕМА ПІДГОТОВКИ ЕВТЕКТИЧНОГО СКЛА ДЛЯ КЕРАМІКИ ТА ДИФЕРЕНЦІЙНО-ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ СКЛА			
			CORDIERIT-1	1		
4	A4	4ТС53.026.161.003.ДР.ПЗ	ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД РОЗРОБЛЕНОЇ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ	1		
5	A4	4ТС53.026.161.004.ДР.ПЗ	ЗАЛЕЖНОСТІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОРДІЄРИТОВОЇ ВІД КІЛЬКОСТІ СКЛА CORDIERIT-1 ТА ТЕМПЕРАТУРИ ВИПАЛУ	1		
6	A4	4ТС53.026.161.005.ДР.ПЗ	ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ОПОРУ ТЕРМІЧНИМ УДАРАМ ТА ПОКАЗНИКИ ВОГНЕТРИВКОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ КОРДІЄРИТОВИХ МАТЕРІАЛІВ	1		
7	A4	4ТС53.026.161.006.ДР.ПЗ	РЕНТГЕНОФАЗОВИЙ АНАЛІЗ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ	1		
8	A4	4ТС53.026.161.007.ДР.ПЗ	МІКРОСТРУКТУРА ЗРАЗКІВ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ	1		
9						

4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ

Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата	Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорої кордієритової кераміки		
Розроб.	Палько Д.Г.						
Перевір	Калішенко Ю.Р.				Літ. Арк. Аркуші		
Н. Контр.	Калішенко Ю.Р.				5 80		
Зав.каф.	Зайчук О.В.						
					ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:

80 с., 13 рис., 8 табл., 9 додатки, 41 джерел.

Об'єкт дослідження – фізико-технічні і хімічні передумови отримання щільноспечених складів температур кордієритових матеріалів за відносно низьких температур із забезпеченням радіопрозорих характеристик.

Мета досліджень – оптимізація низькотемпературного синтезу кордієритової кераміки шляхом введення компонентів через евтектичне скло псевдопотрійної системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (MAS).

Методи дослідження – аналіз патентних і технічних літературних джерел, рентгенофазовий та мікроструктурний аналізи, стандартні керамічні методики визначення фізико-технічних, термічних та діелектричних властивостей матеріалів.

Реалізовано принцип реакційного формування структури під час випалу. Встановлено покращення процесів спікання за рахунок інтенсивної взаємодії компонентів евтектичного скла з кристалічними наповнювачами та внаслідок кристалізації скла, що забезпечує отримання щільноспеченого матеріалу при понижених температурах. Використаний підхід є високоперспективним для інтеграції в технологічні процеси одержання суміжних алюмосилікатних керамічних матеріалів ширшого спектра технічного використання.

У додатках до роботи представлено ілюстративний матеріал у вигляді слайдів презентації, підготовленої для офіційного захисту випускної дипломної роботи та сертифікат учасника XII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія і сучасні технології».

Ключові слова: РАДІОПРОЗОРА КЕРАМІКА, α -КОРДІЄРИТ, ЕВТЕКТИЧНЕ СКЛО, РЕАКЦІЙНЕ СПІКАННЯ, МІКРОСТРУКТУРА, ТЕРМОСТІЙКІСТЬ, ШЛІКЕРНЕ ЛИТТЯ.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень та позначень.....	
ВСТУП.....	
1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	
1.1 Радіопрозорі керамічні матеріали. Їх призначення, вимоги та області застосування.....	
1.1.1 Основні поняття та властивості	
1.1.2 Вимоги до матеріалів радіотехнічного призначення	
1.1.3 Области застосування радіопрозорої кераміки.....	
1.2 Діаграма $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$: особливості системи та її фазового складу.....	
1.3 Технологічні аспекти виготовлення радіопрозорої кордієритової кераміки.....	
1.4 Висновки з огляду науково-технічної літератури.....	
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	
2.1 Характеристика та підготовка сировинних матеріалів	
2.1.1 Варка скла.....	
2.1.2 Методика приготування керамічних шлікерів та оцінка їх реологічних властивостей	
2.2 Особливості підготовки гіпсових форм і формування зразків методом лиття.....	
2.3 Методи оцінки основних фізико-технічних властивостей досліджуваних матеріалів	
2.3.1. Визначення показників водопоглинання, відкритої поруватості та об'ємної густини методом гідростатичного зважування.....	
2.3.2 Визначення механічної міцності на стиск експериментальних	

зразків	
2.3.3 Визначення лінійного коефіцієнта термічного розширення.....	
2.3.4 Рентгенофазовий аналіз матеріалів (РФА).....	
2.3.5 Визначення показника вогнетривкості.....	
2.3.6 Визначення термічної стійкості.....	
2.4 Дослідження властивостей дослідної кордієритової склокераміки.....	
3 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	
3.1 Небезпечні та шкідливі фактори під час виконання дослідницької роботи.....	
3.2 Оцінка пожежовибухонебезпеки.....	
3.3 Профілактичні заходи з охорони праці в лабораторіях.....	
ВИСНОВКИ.....	
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	
ДОДАТКИ.....	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

РПМ – радіопрозорі матеріали;

ДСТУ – державний стандарт України;

РФА – рентгенофазовий аналіз;

ТКЛР – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

MAS – система $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$;

ε – діелектрична проникність;

$\Theta_{\text{ор}}$ – термостійкість;

$T_{\text{вип}}$ – температура випалювання;

SEM – скануюча електронна мікроскопія;

$\sigma_{\text{ст}}$ – межа механічної міцності на стискання, МПа;

$\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;

R – число вогнетривкості.

ВСТУП

Сучасний розвиток високих технологій потребує впровадження матеріалів із унікальним поєднанням експлуатаційних характеристик, серед яких особливе місце посідає радіопрозора технічна кераміка. Вона демонструє високу різноманітність фізико-хімічних і радіотехнічних властивостей, досягнення яких у комплексі є неможливим для інших класів матеріалів. Це відкриває широкі перспективи її застосування у наукомістких галузях – від створення елементів для захисту радіолокаційного обладнання до високочастотних діелектричних підкладок мікроелектроніки. Оскільки метали та їхні сплави є повністю непрозорими для радіохвиль, для цих цілей можуть застосовуватися лише діелектрики: полімери, традиційне технічне скло, склокераміка або кераміка. Проте полімери та промислові стекла мають суттєві обмеження: вони мають низьку термічну стійкість, схильні до високотемпературної деформації, а за умов нагрівання різко збільшують рівень діелектричних втрат у надвисокочастотному діапазоні. Саме тому радіопрозора технічна кераміка стає безальтернативним рішенням. Вона демонструє високу різноманітність фізико-хімічних властивостей, яких неможливо досягти в інших матеріалах, забезпечуючи стабільну роботу обладнання в екстремальних умовах експлуатації [1].

З огляду на це, використання керамічних матеріалів на основі кордієритової фази є актуальним технологічним напрямом, оскільки отримані вироби мають унікальний комплекс характеристик – від мінімального термічного розширення до високої вогнетривкості та радіопрозорості [2].

Проведені дослідження спрямовані на розробку складів кераміки даного складу та вивчення впливу евтектичного скла на інтенсифікацію спікання при знижених температурах, а також на оцінку властивостей отриманих кордієритових матеріалів.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Радіопрозорі керамічні матеріали. Їх призначення, вимоги та області застосування

1.1.1 Основні поняття та властивості

Радіопрозорі матеріали являють собою діелектрики, які не впливають на амплітуду електромагнітної хвилі та забезпечують стабільність її фази під час проходження через них. Їх відмінною рисою є висока прозорість для радіохвиль, що досягається завдяки незначним діелектричним втратам і мінімальному відбиттю радіохвиль у межах робочих температур.

За джерелом походження діелектричної складової радіопроникні матеріали (РПМ) поділяють на дві великі групи: на органічній та неорганічній основах, причому останні, охоплюють керамічні, склокристалічні (ситали), скляні та композиційні структури.

Аналіз першоджерел [3-6] дозволяє сформувати комплексний перелік базових фізико-технічних критеріїв, яким мають відповідати високотемпературні радіопрозорі матеріали:

- Електродинамічні параметри: відносна діелектрична проникність матеріалу не повинна перевищувати 10, а рівень діелектричних втрат обмежений значенням $\leq 0,01$; при цьому у заданому радіочастотному спектрі відбивна здатність хвиль (коефіцієнт відбиття) має становити не більше 1 %;
- Термічні характеристики: коефіцієнт теплопровідності обмежується межею 3,0 Вт/(м·°С), а теплове розширення (показник ТКЛР) не повинно виходити за рамки $5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$;
- Експлуатаційний температурний інтервал: стабільна робота виробу передбачена в межах від мінусових температур до плюс 1500 °С, із обов'язковим збереженням функціональності за максимального теплового навантаження протягом щонайменше 5 хвилин;

– Механічні та гідрофізичні властивості: критична межа міцності структури при згинанні має становити не менше 150 МПа, а показник відкритої пористості (водопоглинання) – близьким до нуля або обмежуватися 1 %;

– Загальна стабільність: обов'язкове збереження незмінності початкових механічних, фізичних та радіотехнічних властивостей під впливом екстремального нагріву в усьому робочому діапазоні частот.

З огляду на затребуваність, властивості та економічну ефективність найбільш широкого застосування набули саме керамічні та склокристалічні матеріали. Залежно від хімічного складу їх можна поділити на оксидні, безкисневі та матеріали на основі алюмосилікатних систем.

1.1.2 Вимоги до матеріалів радіотехнічного призначення

Важливим напрямком розвитку керамічних радіопрозорих матеріалів в останні роки стала розробка безоксидної кераміки. Особливу увагу отримали дослідження, проведені в одному із провідних університетів США, що визначили нітрид кремнію Si_3N_4 цілком задовільним матеріалом для антенних обтічників завдяки своїй діелектричній проникності рівній 9,4. Виняткова міцність цього матеріалу при високих температурах набагато вища, ніж у оксиду алюмінію або берилію, а нітрид кремнію дуже добре протистоїть окисленню і термічним впливам. На ряду з нітридними високотемпературними матеріалами конструкційного призначення є кераміка на основі карбіду кремнію SiC та сіалону SiAlON . Завдяки міцним зв'язкам та особливостям структури, ці сполуки забезпечують максимальну стабільність та міцність деталей [7].

Водночас широке впровадження матеріалів суттєво обмежується високою вартістю нанопорошків, складністю механічної обробки алмазним інструментом, а також його схильністю до дисоціації при випалі, що змушує вводити оксидні добавки, які утворюють скляну фазу і погіршують властивості кераміки при тривалій експлуатації [8-10].

З метою забезпечення оптимального балансу між високими функціональними характеристиками та економічною доступністю виробів доцільно застосовувати кварцову кераміку [11], а також склокристалічні системи на основі алюмосилікатів [12, 13].

Щодо оксидної кераміки, то одним із важливих її представників є керамічні матеріали на основі SiO_2 . Кварцова кераміка є специфічним високотехнологічним матеріалом на основі аморфного кремнезему, унікальність якого полягає в домінуванні склоподібної фази, а виробництво реалізується за керамічною схемою (переважно методом водного лиття шлікерів), що дозволяє обійти проблему екстремальної в'язкості розплаву SiO_2 та створювати великогабаритні деталі. Популярність матеріалу в аерокосмічній та атомній галузях зумовлена стабільними електрофізичними властивостями, хімічною стійкістю, аномальним зростанням міцності при нагріванні та винятковою термостійкістю, викликаною рекордно низьким коефіцієнтом термічного лінійного розширення близько $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Водночас головним технологічним та експлуатаційним викликом є збіг температур спікання та кристобалітизації ($1200\text{-}1350^\circ\text{C}$): поява високотемпературного кристобаліту при випалі або тривалій службі супроводжується критичними об'ємними змінами, що провокує виникнення внутрішніх напружень, падіння міцності та схильність до деструкції виробів [11].

До того ж відомі на сьогодні підходи до зміцнення кварцової кераміки не забезпечують кардинального зростання параметрів механічної міцності без погіршення інших важливих експлуатаційних властивостей матеріалу [11, 13].

Для високоглиноземистих керамічних матеріалів (Al_2O_3) характерне поєднання підвищеної механічної надійності та інертності до дії хімічно активних реагентів. Водночас їх впровадження обмежене енергомістким процесом термообробки (температура випалу сягає 1700°C) і низьким

опором різким термічним ударам, що звужує діапазон експлуатації до 200 °C [14].

Згідно з ДСТУ 2267-93 «Матеріали керамічні електротехнічні. Класифікація та технічні вимоги» регламентує основні вимоги до радіопрозорої кераміки, яку використовують у виробництві електротехнічних приладів. Цей нормативний документ класифікує керамічні РПМ залежно від їх складу:

- кераміка на основі лужних алюмосилікатів (порцеляни);
- кераміка на основі силікатів та алюмосилікатів магнію (стеатити, кордієрит).

Всі види керамічних РПМ поділяють на марки 100, 200 та 400 [12].

Доцільність застосування цих систем обумовлена специфікою їхніх цільових кристалічних фаз, де лужні склади (цельзіан, анортит) забезпечують стабільність діелектричних властивостей, магнієві (стеатит, кордієрит) – мінімальні втрати у СВЧ-діапазоні та високу термостійкість, а літєві (сподумен) – стійкість до екстремальних теплових ударів завдяки майже нульовому термічному розширенню.

Сподуменова та евкрепитова кераміка характеризуються надзвичайно малим, а часом навіть негативним коефіцієнтом теплового розширення, що робить її дуже стійкою до різких перепадів температури. Однак, присутність іонів літію (Li^+), які легко переміщуються, значно погіршує їх діелектричні властивості. Зокрема, зростають діелектричні втрати, особливо при нагріванні, що є серйозним недоліком для застосувань, де потрібна прозорість для радіохвиль [15, 16].

Цельзіанова кераміка характеризується високою вогнетривкістю та значною хімічною стійкістю. Водночас для цельзіану складу $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ властиві поліморфні перетворення, що супроводжуються зміною кристалічної будови залежно від температури. Наявність таких фазових переходів ускладнює отримання щільної кераміки та може спричиняти виникнення залишкових напружень під час охолодження виробів.

Додатковим обмеженням є порівняно високе значення діелектричної проникності ($\epsilon \approx 6,5-7,5$), яке не завжди відповідає вимогам до матеріалів для високоефективних радіопрозорих конструкцій [11].

Для виготовлення матеріалів, здатних працювати за високих температур, використовують безлужні та низьколужні алюмосилікатні композиції. Серед них, зокрема $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, у яких у процесі кристалізації формується моноклінний стронцієвий анортит [14]. Поряд із ними застосовують матеріали системи $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, характерною фазою яких є моноклінний цельзіан [11, 17]. Наявність зазначених кристалічних фаз забезпечує збереження властивостей матеріалів за температур понад 1100 °С. Разом із тим для них характерні підвищені значення густини та температурного коефіцієнта лінійного розширення, що звужує можливості використання в окремих галузях [18-20].

Серед алюмосилікатних матеріалів окреме місце займає кордієритова кераміка, для якої характерні низька густина, невисокий температурний коефіцієнт лінійного розширення та висока термостійкість. Завдяки цьому кордієритові керамічні та склокерамічні матеріали застосовують для виготовлення виробів різного призначення, що експлуатуються в умовах циклічних температурних експлуатаційних навантажень [21, 22].

Розглядаючи номенклатуру радіопрозорих керамічних матеріалів, слід також відзначити форстеритові, стеатитові, цирконові, воластонітові та мулітовмісні системи. Форстеритова та стеатитова кераміка характеризуються поєднанням задовільних діелектричних властивостей, термостійкості та технологічності виготовлення. Цирконові матеріали вирізняються низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення, високою термічною стабільністю та стійкістю до теплових ударів. Воластонітовмісна кераміка привертає увагу можливістю формування необхідної структури за порівняно невисоких температур випалу. Серед алюмосилікатних матеріалів важливе місце займають сполуки мулітового

ряду, а саме мулітова та мулітокремнеземна кераміка, які характерні високою вогнетривкістю, механічною міцністю та стабільністю властивостей.

З огляду на широкий спектр функціональних властивостей деяких зазначених матеріалів, їх комплексні фізико-технічні, теплофізичні та електродинамічні характеристики, що визначають придатність до використання у високочастотній та радіопрозорій техніці, систематизовано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика ключових параметрів та діелектричних властивостей промислової електрокераміки [11]

Властивості	Високоглиноземна кераміка		Стеатитова кераміка	Форстеритова кераміка	Кордієритова кераміка	Цирконова кераміка	Цельсіанова кераміка	Воластонітова кераміка
	Муліто-кремнеземна	Муліто-корундова						
Температура випалу, °C	1300-1450		1190-1300	1320-1380	1300-1410	1550-1600	1380-1400	1200-1300
Інтервал випалу, °C	50-80		10-40	—	15-20	30-50	—	50-80
Уявна щільність ρ , г/см ³	—	3,35-3,45	2,61-3,00	3,00-3,04	2,26-2,08	—	3,0-3,1	2,7-2,85
Міцність: σ_{cm} , МПа σ_{kz} , МПа	400-1000 60-120	1000-2000 120-250	490-981 120-190	— 160-200	200-220 69-88	~ 686 —	— 90-110	— 150-180
Діелектрична проникність ϵ	5,5-6,5	6,5-9,0	5,5-7	6,8-7	2,97	—	6,5-7,0	6,5-7,0
Питомий опір ρ_v , Ом·см t = 100 °C t = 400 °C	10^9-10^{12} 10^6	$10^{11}-10^{14}$ 10^{10}	$10^{13}-10^{15}$ 10^8-10^{11}	$10^{14}-10^{16}$ 10^9-10^{10}	$2 \cdot (10^{11}-10^{13})$ —	$1,2 \cdot 10^3$ —	$10^{15}-10^{16}$ —	10^{13} —
$tg \delta \cdot 10^{-4}$ (f=1МГц) t = 20 °C t = 80 °C	30-60 —	5 —	25-3 35-3	1-3 2-3	—	—	—	3-4 —
Пробивна напруга $E_{пр}$, кВ/мм	30-35	30-35	30-45	35-45	—	—	35-45	30-50
ТКЛР $\alpha \cdot 10^6$, 1/°C 20-100 20-700	3,5-4,8 5,3	— 3,6-5,5	6,4-5,5 8,4-7,7	— 8-10	1,97-2,32 3,35-3,05	— 4,0-4,6	2,1-2,2 —	5,6-7,00 —
Термостійкість	160-170	—	—	—	640-700	висока	висока	—

1.1.3 Області застосування радіопрозорії кераміки

Забезпечення розширення сфер реалізації, надсучасної радіопрозорії кераміки для потреб електротехніки є надзвичайно важливим завданням для прогресу. Це спонукає дослідників до поглибленого вивчення багатофункціональності та фундаментальних механізмів формування

структури керамічних матеріалів [23]. Силікатні матеріали, що придатні для електротехнічного застосування вирізняються великою універсальністю. Узагальнені відомості щодо класифікаційних груп промислової електрокераміки, їхнього компонентного складу та експлуатаційних характеристик систематизовано в табл. 1.2 [24, 25].

Таблиця 1.2 – Сфери застосування та функціональні властивості промислової електрокераміки і скломатеріалів [24]

Призначення	Матеріал	Область застосування	Властивості матеріалів
Пасивні компоненти	Al_2O_3	MLCC конденсатори, резистори	Низька електропровідність для ізоляції різних шарів електродів, здатність розсіювати енергію у вигляді тепла
П'єзо-електрика	$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, $BaTiO_3$	п'єзоелектричні пристрої	Високі п'єзоелектричним коефіцієнтам й механічних властивостей для перетворення механічних навантажень в електричні сигнали і навпаки
Ізолятори	Порцеляна, стеатитова чи кордієритова	свічки запалювання, бобіни котушок, тримачі електронних трубок	Високий питомий опір ізоляції, низькі діелектричні втрати та оптимальні діелектричні властивості при різних температурах і частотах
Інтегральні схеми та напів-провідники	Al_2O_3 , AlN, BeO	підкладки та упаковка, тиглі, носії для пластин	Низька діелектрична проникність й втрати, висока теплопровідність, хімічна стабільність для надійності підкладок інтегральних схем й виробництва напівпровідників
Електро-кераміка	Магніти на основі фериту, ITO, SLT, SYT	постійні магніти, тонкоплівкові транзистори	Електронна провідність для магнітних та електронних компонентів
Керамічні друковані плати	Al_2O_3 , AlN, SiC	високочастотна електроніка, світлодіодне освітлення, силова електроніка	Низькі втрати сигналу, висока діелектричну проникність, для радіочастотних та мікрохвильових ланцюгів, ефективне розсіювання тепла для світлодіодних модулів, термічну стабільність для силової електроніки
Скло	алюмосилікатні, кварцові чи боратні стекла	дисплеї, гнучкі пристрої	Універсальність у виробництві панелей і гнучких пристроїв, та забезпечення захисту від факторів навколишнього середовища

Комплексні характеристики властивостей керамічних матеріалів – зумовлює їх високу затребуваність на ринку для розв'язання важливих фундаментальних та прикладних завдань, що постають перед наукою матеріалознавства [23]. Тому в надвисоко- та радіочастотній техніці промислове застосування знайшли ситали різного речовинного складу, зокрема і які є базою для виготовлення, радіолокаційних комплексів,

антенних обтічників, ізоляторів та плат мікросхем. Залежність між фазовим складом і сферами експлуатації таких матеріалів наведено в табл. 1.3 [24, 25].

Таблиця 1.3 – Напрями застосування та фазовий склад комерційних склокристалічних матеріалів [24]

Виробник	Комерційна назва	Кристалічна фаза	Застосування
Schott, Німеччина	Foturan	дисилікат літію	фоточутливі матеріали
	Zerodur	β -кварц	дзеркала телескопа
Corning Inc., США	Fotoform/Fotoceram	дисилікат літію	світлочутливі матеріали
	Пірокерам 9606	α -кордієрит	антенні обтічники
	9664	шпінель-енстатит	магнітні підкладки для дисків пам'яті
Nippon ElectricGlass, Японія	ML-05	дисилікат літію	магнітні підкладки для дисків пам'яті
ТОВ «Спецтех стекло А», Україна	АС-418 АС-380 АС-023	сподумен, кордієрит, дисилікат літію	антенні обтічники
ПАТ Ситал, Україна	СТ-50-1	кордієрит	плівкові мікросхеми
НВП «ТЕПЛОЕНЕРГОМАШ», Україна	8к	сподумен	радіолокаційні прилади

Системна еволюція та девелопмент нових генерацій високоточних керованих засобів ураження класів «повітря–повітря», «повітря–земля», а також ракетних комплексів протиповітряної та зенітно-ракетної оборони (ЗРК) імперативно диктують необхідність фундаментальних розробок і трансферу у виробництво диверсифікованих матричних та композиційних матеріалів. Останні повинні характеризуватися суттєво інтенсифікованими, синергетично поєднаними показниками фізико-хімічних, механічних, високотемпературних та електродинамічних характеристик у критичних експлуатаційних режимах [26].

У цьому контексті РПМ класифікуються як стратегічно інваріантний компонент аерокосмічного сектору завдяки їхній здатності зберігати інваріантність діелектричних та міцнісних параметрів, а також високу жаро- та термостійкість в умовах екстремального теплового флуктуаційного поля та широкого частотного діапазону [27].

Для серійного виробництва радіопрозорих термостійких обтічників різних розмірів та форм для авіаційної техніки та ракет для такого озброєння

як МіГ–29, Су–27, Су–30, «Куб», «Бук» та С–300 (усі модифікації) використовуються матеріали, що базуються на основі високочистої кварцової кераміки та літій-алюмосилікатної склокераміки (ситалів). Натомість, для превентивного захисту наземних і морських радіолокаційних та антенних систем від деструктивного атмосферного та антропогенного впливу раціональним є застосування полімерних композиційних РПМ [28]. Водночас моноклінна модифікація барієвого алюмосилікату — моноцельзіан (цельзіан), внаслідок мінімальних значень тангенса кута діелектричних втрат, виступає перспективною фазовою матрицею підкладок високочастотних інтегральних мікросхем [29].

Практично весь асортимент сучасних високотехнологічних РПМ акумульовано в межах систем на основі диоксиду кремнію SiO_2 , Si_3N_4 та системи $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (де $\text{R} = \text{Li}_2, \text{Na}_2, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Zn}$). Зазначені високощільні та пористі керамічні фази є домінуючими під час проектування та індустріального синтезу конструкційних елементів радіоелектронної апаратури (зокрема, високочастотних конденсаторів, прецизійних котушок індуктивності та високовольтних електроізоляторів), що працюють на підвищених частотах [30].

1.2 Діаграма $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$: особливості системи та її фазового складу

Сучасна конфігурація трикомпонентної діаграми фазової рівноваги системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, представлена на рисунку 1.1.

У межах цієї системи, окрім бінарних силікатних фаз магнію (форстериту $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) та алюмінію (муліту $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) виділяється високотемпературна магнезіальна (алюомагнезієва) шпінель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Дана сполука відіграє визначальну роль у технології вогнетривких та керамічних матеріалів і характеризується конгруентним плавленням при температурі 2135°C . Ряд досліджень вказує на те, що саме

алюмомагнієва шпінель виступає первинним продуктом під час перебігу твердофазних реакцій у системі MAS за довільних співвідношень вихідних оксидних компонентів, що обумовлено максимальними кінетичними параметрами її утворення. Потрійні сполуки в цій системі представлені кордієритом ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) та сапфірином ($4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Кордієрит плавиться інконгруентно при 1540°C , із розпадом на рідку фазу та кристали муліту. Цей мінерал відзначається складною і не повністю з'ясованою природою поліморфних перетворень, формуючи кілька кристалічних модифікацій та метастабільних фаз; крім того, для кордієриту властива схильність до утворення твердих розчинів [25].

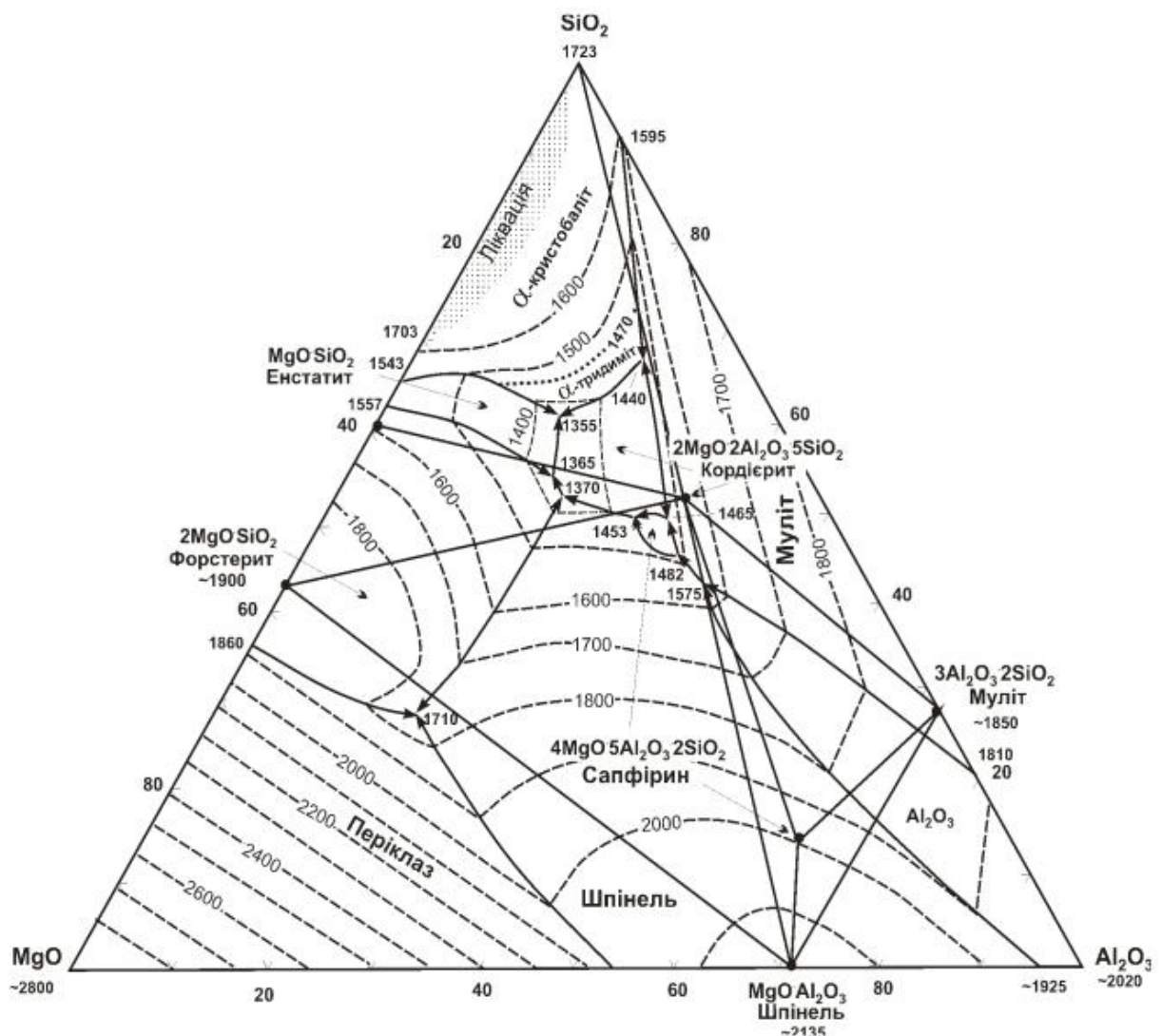


Рисунок 1.1 – Система $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Другою стабільною потрійною сполукою, яка зафіксована на фазовій діаграмі стану MAS є сапфірин $4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (у літературних джерелах зустрічаються також альтернативні варіанти його стехіометричного складу зі зміщеним оксидним співвідношенням). Сапфірин плавиться інконгруентно при 1475°C , розкладаючись на розплав та шпінелеву фазу. Описано ще кілька алюмосилікатів магнію, проте за умов нормального атмосферного тиску жоден із них не здатний до стабільного існування в рівновазі з рідкою фазою цієї системи. Типовим представником таких сполук є природний мінерал піроп $3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$, що належить до сімейства гранатів. Штучний синтез піропу можливий виключно в умовах надвисоких тисків – $(6\div 12) \cdot 10^3$ МПа та при температурах 1500 ± 150 °C. Діаграма стану MAS має фундаментальне практичне значення для розробки широкого спектра вогнетривів (корундових, периклазових, форстеритових, шпінельних), спеціальної технічної кераміки (стеатитової, кордієритової) та силікатних склокристалічних матеріалів. Особливу цінність система становить для створення термостійкої кераміки та ситалів на основі кордієритової фази, яка володіє аномально низьким або інваріантним (негативним) коефіцієнтом термічного розширення [25, 31].

1.3 Технологічні аспекти виготовлення радіопрозорії кордієритової кераміки

Особливе місце серед керамічних матеріалів займає кераміка з кордієриту. Це унікальна речовина, яка є єдиним стабільним потрійним з'єднанням у системі оксидів магнію, алюмінію та кремнію (MAS) (формула: $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$). Сам кордієрит має складну поведінку при нагріванні: він плавиться не повністю, а частково, і може існувати в різних кристалічних формах, утворюючи як стабільні, так і тимчасові (метастабільні) тверді розчини.

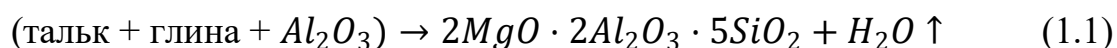
Завдяки своєму комплексу цінних фізико-технічних властивостей, кордієртова кераміка широко використовується в різних галузях промисловості та техніки зокрема як термостійкий матеріал для надвисокочастотного застосування.

Хоча кордієрит можна отримати безпосередньо з оксидів, для промислового виробництва кераміки частіше використовують природні матеріали. Це, як правило:

- малозалізистий тальк;
- технічний оксид алюмінію;
- вогнетривка високопластична глина.

Ці компоненти змішують у певних пропорціях, щоб після випалу отримати максимальну кількість кордієриту в готовому виробі [32].

Процес утворення кордієриту можна описати хімічним рівнянням, яке показує взаємодію вихідних компонентів з виділенням води. Загальний вигляд:



Синтез щільноспеченого кордієриту з суміші вихідних оксидів або природної сировини супроводжується значними технологічними складнощами через специфічну особливість кордієритових мас – дуже короткий діапазон температур, в якому відбувається їх спікання.. Утворення кордієриту починається приблизно при 1380°C, а вже при 1410°C він починає плавитися. Загалом інтервал спікання становить усього 10–20 °C при температурах випалу 1450–1550 °C.

Ефективність процесу спікання кордієритових матеріалів істотно залежить від температурно-часових параметрів термообробки. За температур нижче 1450 °C не досягається необхідний рівень ущільнення керамічного черепка, що обумовлює неповне протікання процесів спікання. Водночас надмірна тривалість витримки при температурі випалу може призводити до

порушення фазової рівноваги системи, деградації кристалічної структури кордієриту та утворення надлишкової кількості склофази, присутність якої погіршує термомеханічні та діелектричні характеристики матеріалу [33].

Щоб розширити цей діапазон і отримати якісний спечений виріб, до складу шихти додають невелику кількість (від 5 до 7%) оксиду цинку, польового шпату або інших плавнів. Це дозволяє зберегти спечений стан маси в ширшому температурному діапазоні.

Технологія приготування кордієритових мас схожа на виробництво порцеляни. Завдяки пластичності, яку надає глина, вироби можна формувати різними методами: пластичним формуванням, напівсухим пресуванням та литтям з водних шлікерів. Для виробів складної форми використовують гаряче лиття під високим тиском з попередньо випалених мас або лиття з водних шлікерів.

Сучасні дослідження у сфері склокерамічних матеріалів виокремлюють два основні напрямки розвитку, що дозволяють оптимізувати виробництво або покращити властивості кінцевого продукту:

- Перший – це продовження успішного застосування класичного методу, який передбачає формування виробів безпосередньо з розплавленого скла з подальшою термічною обробкою для досягнення кристалізації [33].
- Другий напрямок – це зростаюча роль порошкового методу отримання ситалів, який спирається на принципи керамічної технології. Цей підхід спирається на принципи керамічної технології. Вихідне скло подрібнюється до стану порошку, формується за допомогою стандартних керамічних технік, а потім проходить термічну обробку для спікання та кристалізації. У порівнянні з класичною скляною технологією, порошковий метод дає можливість суттєво розширити діапазон складів вихідних стекол та варіативність виробів, що виготовляються [33].

Разом із тим суттєвим обмеженням зазначених технолоогічних способів є варіння стекол кордієритового складу в системі MAS при високій температурі що може досягати ≈ 1600 °C. Задля досягнення високого ступеня

ущільнення кордієритової кераміки за нижчих температур випалу використовують різні модифікуючі добавки та склосв'язки [34, 35].

1.4 Висновки з огляду науково-технічної літератури.

Огляд науково-технічної літератури дозволяє оцінити сучасний стан розробок у галузі радіопрозорих матеріалів та визначити найбільш перспективні напрями їх подальшого вдосконалення. Серед широкого спектра керамічних систем особливе місце займає кордієритова кераміка, яка завдяки низькій діелектричній проникності ($\epsilon = 4,5\text{--}6,0$), мінімальним діелектричним втратам ($\text{tg}\delta \leq 10^{-3}$), низькому температурному коефіцієнту лінійного розширення та високій термостійкості відповідає комплексу вимог, що висуваються до сучасних радіопрозорих конструкцій. Зазначені властивості забезпечують можливість її використання для виготовлення антенних обтічників, елементів антенних систем та інших виробів надвисокочастотного призначення.

Порівняльний аналіз оксидної, безкисневої та алюмосилікатної кераміки показав та, що кордієрит належить до числа матеріалів, які найбільш повно поєднують високі експлуатаційні та радіотехнічні характеристики. Завдяки анізотропній кристалічній структурі для нього характерні надзвичайно низькі значення коефіцієнта термічного розширення на рівні $(1,97\text{--}3,05) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, що забезпечує високу стійкість до термічних ударів без погіршення діелектричних властивостей.

Водночас аналіз теоретичної бази вказує на те, що широке промислове застосування кордієритової кераміки стримується технологічними труднощами її отримання. Формування щільноспеченої структури відбувається в надзвичайно вузькому температурному інтервалі, розташованому поблизу температури інконгруентного плавлення кордієриту. За умов традиційного твердофазного синтезу це часто призводить до збереження підвищеної пористості або деформації виробів унаслідок

перепалу, що негативно впливає на механічні, теплофізичні та радіотехнічні характеристики матеріалу. Додатково існуючі склокерамічні технології здебільшого пов'язані з необхідністю варіння стекол кордієритового складу, у високотемпературному режимі, який є досить енергомістким.

Теоретичні дослідження демонструють наявність наукового та технічного протиріччя. Воно полягає у необхідності зниження температури шляхом керування процесами фазоутворення та формування мікроструктури спікання кордієриту при одночасному прагненні зберегти його чудові радіотехнічні та термічні характеристики. Ця суперечність диктує необхідність проведення всебічних досліджень, спрямованих на створення нових багатокомпонентних складів шихти та оптимізацію режимів випалу. Одним із таких підходів є введення добавок або склозв'язок.

Таким чином, аналіз літературних даних свідчить про доцільність дослідження впливу евтектичного скла системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ на процеси формування структури та фазового складу кордієритової кераміки при знижених температурах випалу. Це дозволить визначити умови отримання щільноспечених матеріалів із необхідним комплексом фізико-технічних і радіотехнічних властивостей.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика та підготовка сировинних матеріалів

2.1.1 Варка скла

Для варки скла використовували наступні компоненти технічної чистоти:

- тальк,
- технічний оксид алюмінію (глинозем),
- кремній діоксид марки SiO_2 ,
- борна кислота ($\text{H}_3\text{BO}_3 \geq 99,8$ мас.%).

Вихідні сировинні матеріали, які не потребували попередньої підготовки, зважували на аналітичній вагах із високою точністю до другого знаку після коми, відповідно до розрахункового складу. Для покращення процесу склоутворення та зниження температури варіння до складу шихти додатково вводили оксид бору у кількості 10 мас. % понад 100 мас. %. Зазначена кількість добавки забезпечує належну плавкість розплаву без суттєвої зміни фазового складу матеріалу після його подальшої кристалізації. Додатковою перевагою використання оксиду бору є покращення змочуваності кристалічних компонентів розплавом, що позитивно впливає на міжфазну взаємодію та формування однорідної структури матеріалу.

Синтез скла здійснювали в стандартних корундових тиглях у лабораторній електропечі з карбідокремнієвими нагрівальними елементами за температури $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ із витримкою за максимальної температури протягом 1 години. Готовність розплаву визначали органолептично за якістю витягнутої скляної нитки.

Одержане скло піддавали грануляції шляхом гартування розплаву (виробленням на металеву плиту під притиск). Отримані скляні пластини піддавали попередньому грубому механічному руйнуванню, після чого здійснювали тонкий помол у фарфоровому барабанному млині. Подрібнення

проводили контролюючи тонкість помелу залишку на ситі № 0063 (величина отворів становить 63 мкм) до його повного проходження.

2.1.2 Методика приготування керамічних шлікерів та оцінка їх реологічних властивостей

Шлікер являє собою концентровану водну суспензію сировинних компонентів, яка призначена для формування виробів методом лиття в пористі (переважно гіпсові) форми.

Для зниження в'язкості та підвищення плинності суспензії за мінімального вмісту води до її складу вводять розріджувачі – *дефлокулянти (електроліти)*. Їхня дія базується на створенні однойменних електричних зарядів на поверхні дисперсних частинок, що зумовлює їх взаємне відштовхування та руйнування коагуляційних структур.

Приготування шлікеру доцільно проводити за температури навколишнього середовища близько 21-25 °С, оскільки температура впливає на кінетику гідратації та ефективність дії електролітів. Особливу увагу приділяють гомогенізації маси: для досягнення високої якості виробів суспензія має бути рівномірно перемішаною, без агрегатів та флокул твердої фази. Якісно підготовлений шлікер повинен мати високу здатність до розтікання, а при витіканні з каліброваного отвору (або візуальному контролі) утворювати тонку безперервну цівку [36].

У даній дослідній роботі введення до складу кордієритової кераміки глинистого компонента (каоліну) у кількості 30 мас.% дозволяє ефективно регулювати реологічні (структурно-механічні) властивості водних шлікерів. Оптимальні показники плинності системи та стабільна кінетика набору маси керамічних зразків під час лиття забезпечувалися встановленням технологічної вологості шлікеру на рівні 26–27 %.

2.1 Особливості підготовки гіпсових форм і формування зразків методом лиття

Для виготовлення експериментальних зразків застосовували метод шлікерного лиття в пористі гіпсові форми. Форми отримували шляхом змішування будівельного гіпсу з водою, при цьому водно-гіпсове відношення підбирали таким чином, щоб кількість води становила 60–70 % від маси гіпсу. Після тужавіння, тверднення та висушування гіпсових заготовок у них шляхом механічної обробки з використанням спеціальних свердел і допоміжних пристосувань. Конфігурацію робочого простору розраховували відповідно до лінійних розмірів експериментальних зразків із урахуванням повітряної та випалювальної усадки маси, а самі форми виконували розбірними для забезпечення безперешкодного вилучення відлитих заготовок.

Для кордієритової кераміки як сировинні компоненти застосовували:

- скло евтектичного складу псевдопотрійної магнійалюмосилікатної системи (MAS);
- збагачений каолін;
- $\text{Mg}(\text{OH})_2$;
- технічний оксид алюмінію (Г-00);
- заздалегідь підготовлені кордієритовий і каоліновий шамоти, які застосовували як отошувачі з метою зменшення повітряної усадки керамічних мас.

Каоліновий шамот отримували шляхом термічної обробки збагаченого каоліну марки ZRef-1 за температури 800 °С.

Для приготування кордієритового шамоту використовували суміш до якої входили збагачений каолін, тальк і глинозем. Кількість було розраховано згідно зі стехіометрією, необхідною для повноцінного утворення кордієриту.

Для отримання кордієритового шамоту вихідні мінеральні речовини піддавали спільному мокрому подрібненню в кульовому млині (вологість становила $W = 35\%$), контролюючи процес до повного процідження шлікеру

крізь сітку з розміром комірок 63 мкм. Після зневоднення суспензії проводили реакційне спікання заготовки за температури 1200 °С, витримуючи її за заданих умов протягом 1 години. Синтезований матеріал знову розмелювали до фракції, що повністю проходить крізь сито з розміром отворів 100 мкм (№ 01). Готовий шамот додавали до базової кордієритової шихти як еквівалентну заміну відповідної кількості MgO , Al_2O_3 та SiO_2 .

Зважування вищевказаних сировинних матеріалів для приготування шлікерної суспензії здійснювали на лабораторних електронних вагах (дискретність відліку становить 0,01 г) відповідно до розрахунку балансу шихти. Розрахункову кількість води та дефлокулянта (електроліту) вводили в кількості мас. % понад 100 % сухої маси шихти, після чого суміш завантажували у фарфоровий барабан. Диспергування та гомогенізацію шлікеру проводили за раніше описаним принципом (до процідження шлікеру крізь сітку з розміром комірок 63 мкм).

Отриманий шлікер відливали в підготовлені гіпсові форми, робочі поверхні яких попередньо обробляли 2,5 %-вим водним розчином альгінату натрію. Ця технологічна операція дозволяє сформувати на поверхні форми тонку напівпроникну мембрану (плівку), яка ефективно пропускає воду в пористий простір гіпсу, але повністю затримує дисперсні частинки твердої фази шлікеру, запобігаючи їх прилипанню до стінок форми та забезпечуючи безперешкодне й чисте вилучення готових заготовок після розбирання.

У результаті формували серії заготовок у вигляді циліндрів діаметром і висотою 10 мм, балочок з квадратним перетином 5×5 мм та довжиною 50 мм, циліндричних стержнів діаметром 8 мм і довжиною 80 мм, а також круглі диски діаметром 50 мм та завтовшки 5 мм. Піроскопи для термомеханічних випробувань на вогнетривкість мали форму зрізаної тригранної піраміди з висотою 30 мм та основами 8 мм (нижня) і 2 мм (верхня). Після вилучення з форм сирцеві заготовки піддавали сушінню до залишкової вологості не більше 1 %. Завдяки високій зв'язувальній здатності каолініту, відформовані вироби після виймання з пористих гіпсових форм мають ббдостатню міцність

у сухому стані (міцність сирцю) для проведення подальших технологічних операцій.

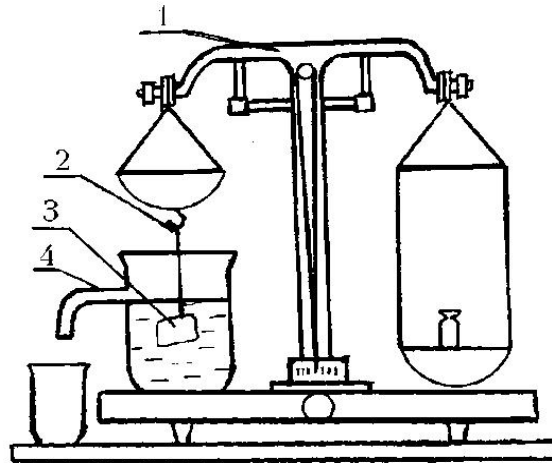
Випал експериментальних зразків проводили в лабораторній електричній печі з карбідокремнієвими нагрівальними елементами в повітряному середовищі за постійної швидкості підйому температури $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 1 хв. Для запобігання взаємодії зразків із матеріалом поду печі та їхнього можливого приварювання, заготовки розміщували на вогнетривких шамотних підставках (лящадах), засипаних тонкодисперсним оксидом алюмінію (глиноземом). Режим випалу мав ступінчастий характер із урахуванням даних диференційно-термічного аналізу вихідного скла. Спочатку фіксували ізотермічні витримки тривалістю 1 година за температур $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура розм'якшення скла) та $990\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура інтенсивної кристалізації). Кінцевий етап термічної обробки полягав у досягненні граничних температур випалу ($T_{\text{вип}}$) – 1250 , 1300 і $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$, за кожної з яких зразки витримували впродовж однієї год. Загальна тривалість циклу нагрівання та витримок становила 6–7 годин, після чого охолодження зразків здійснювали в інерційному режимі разом із піччю до кімнатної температури.

2.2 Методи оцінки основних фізико-технічних властивостей досліджуваних матеріалів – [11, 12, 32, 36]

2.2.1. Визначення показників водопоглинання, відкритої поруватості та об'ємної густини методом гідростатичного зважування

Експериментальне визначення водопоглинення, відкритої пористості та уявної щільності зразків здійснювалося за такою методикою: спочатку циліндричні зразки зважували на повітрі за допомогою технічних ваг (із похибкою не більше $0,01\text{ г}$). Далі, з метою повного насичення водою, зразки поміщали у вакуум-шафу на одну годину, доки не припинялося газовиділення. Після насичення, поверхню зразків протирали вологою тканиною, щоб усунути надлишки вологи. Потім проводили повторне

зважування в повітрі на технічних терезах та у воді за допомогою гідростатичних терезів (Рисунок 2.1). Для забезпечення достовірності результатів, дослідження проводили тричі паралельно, а отримані показники усереднювали.



1 – терези; 2 – підвіска; 3 – дослідний зразок; 4 – склянка зі зливною трубкою

Рисунок 2.1 – Гідростатичні терези

Водопоглинення знаходили за формулою:

$$B = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де m – маса зразка, зваженого у повітрі, г;

m_1 – маса зразка, насиченого водою, зваженого у повітрі, г.

Відкриту пористість розраховували за формулою:

$$P_0 = \frac{m_1 - m}{m_1 - m_2} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де m_2 – маса зразка, насиченого водою, зваженого у воді, г.

Уявна щільність розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2}, \text{ г/см}^3 \quad (2.3)$$

2.3.2 Визначення механічної міцності на стиск експериментальних зразків

Для визначення межі міцності на стискання, яка є максимальним стискаючим навантаженням, що призводить до руйнування зразка, використовували циліндричні зразки. Ці зразки мали однакові розміри (діаметр і висоту) та ретельно відшліфовані, паралельні поверхні для прикладання навантаження. Процес випробування включав шліфування зразків, вимірювання площі їхньої стискаючої поверхні, а потім стискання на гідравлічному пресі. Розрахунок межі міцності на стискання ($\sigma_{ст}$, кг/см²) здійснювався за допомогою формули

$$\sigma_{ст} = \frac{P}{F_{зр}} \quad (2.4)$$

де $\sigma_{ст}$ – межа міцності на стискання, кг/см²;

P – руйнуюче навантаження, кг;

$F_{зр}$ – площа стискання зразка, см².

2.3.3 Визначення лінійного коефіцієнта термічного розширення

Вимірювання ТКЛР здійснювалося за допомогою автоматичного кварцового дилатометра ДКВ-5А. Пристрій забезпечує реєстрацію кривої розширення скла в межах температурного інтервалу, що охоплює весь процес до досягнення точки початку розм'якшення.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися циліндричні зразки (штабики). Вимірювання довжини зразків проводилося штангенциркулем з точністю до 0,1 мм. Кожен зразок розміщувався в центральній частині кварцової трубки, забезпечуючи осьове співпадання з кварцовим стрижнем. Оскільки довжина зразків була змінною, для досягнення стандартизованої сумарної довжини (50 ± 2 мм) застосовувалися додаткові кварцові циліндри (штабики). Після монтажу зразка в трубці, він

фіксувався. Потім трубка з зразком поміщалася в піч. Після досягнення заданого тиску пружини індикатора на зразок, фіксатор розблоковувався. Система охолодження, що включала проточний холодильник, була активна.

Температурний режим нагрівання зразка був наступним: до 80°C зі швидкістю 0,5 град/хв, від 80°C до 200°C протягом 1 години (зі швидкістю не більше 4 град/хв), і вище 200°C зі швидкістю 4 град/хв. Зміна довжини зразка внаслідок термічного розширення реєструвалася за показаннями індикатора. За одержаними даними знаходили ТКЛР у потрібних температурних інтервалах за формулою:

$$\alpha_{KB} = \frac{\Delta l_t}{l_0 \cdot (t - t_0)} \quad (2.5)$$

де l_0 – початкова довжина зразка при температурі t_0 , мм;

Δl_t – видовження зразка в температурному інтервалі $(t - t_0)$, мм;

$(t - t_0)$ – інтервал температур, °C;

α_{KB} – температурний коефіцієнт лінійного розширення кварцового скла в температурному інтервалі $(t - t_0)$, 1/град.

Результати визначали з точністю $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ 1/град.



Рисунок 2.2 – Кварцовий дилатометр ДКВ-5А

2.3.4. Рентгенофазовий аналіз матеріалів (РФА)

Дослідження кераміки за допомогою рентгенівських променів базується на їхній здатності взаємодіяти з атомами в кристалічній структурі. Оскільки довжина хвилі рентгенівського випромінювання близька до відстаней між атомами, вони відхиляються (дифракція) при проходженні крізь матеріал. Ці промені відбиваються від атомних площин, подібно до світла від дзеркала. Коли відбиті хвилі збігаються певним чином, вони посилюють одна одну (інтерференція), що описується законом Вульфа-Брегга:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \Theta \quad (2.6)$$

де n – ціле число (1,2,3...), яке визначає порядок відбиття;

Θ – кут скочвання променя, град;

λ – довжина хвилі, Å;

d – міжплощинна відстань, Å.

Для аналізу складу склокераміки використовували порошковий метод рентгенівської дифракції Дебая-Шерера. Для виявлення відбитих рентгенівських променів застосовували лічильники Гейгера, які рухалися навколо зразка, реєструючи інтенсивність випромінювання у вигляді рентгенограми. Для визначення кристалічного складу використовували рентгенівський дифрактометр ДРОН-3.

2.3.5. Визначення показника вогнетривкості

Оцінку вогнетривкості розробленої кераміки проводили за стандартною методикою, що базується на деформації («падінні») контрольного піроскопа, спресованого з дисперсної маси досліджуваного складу. Фіксацію критичної точки процесу здійснювали в момент дугоподібного згинання піроскопа під дією температури до торкання його вершиною вогнетривкої підставки.

Для проведення випробувань формували зразки, що мали геометрію зрізаної тригранної піраміди заввишки 30 мм з лінійними параметрами нижньої та верхньої основ 8 мм і 2 мм відповідно. Термічну обробку зазначених тестових елементів реалізували за оптимальних для даного типу кераміки температурних режимів.

Під час випробувань піроскопи розміщували на спеціальній підставці з вогнетривкої маси разом з еталонними піроскопами. Підставку поміщали в піч і підвищували температуру зі швидкістю 5°C за хвилину. При досягненні температури, близької до очікуваної межі вогнетривкості, здійснювали візуальний контроль за поведінкою дослідних піроскопів. Вогнетривкість визначали як температуру, при якій піроскоп згинався так, що його вершина торкалася поверхні підставки.

Якщо під час випробування спостереження за піроскопами було ускладнене, нагрів припиняли при температурі, що відповідала еталонному піроскопу з номером, близьким до очікуваної вогнетривкості дослідного зразка. Після цього підставку виймали з печі і фіксували номер піроскопу, який деформувався подібно до дослідного, або, за можливості, два номери — той, що зігнувся трохи більше, і той, що трохи менше, ніж дослідний піроскоп.

2.3.6. Визначення термічної стійкості

Термостійкість матеріалу визначається як найбільша різниця температур, яку зразок може витримати без видимих пошкоджень.

Зразки поміщають у піч, розігріту до певної температури. Ця температура визначається температурним перепадом у 50 °C. Зразки витримують у печі протягом 20 хвилин. Після нагрівання зразки швидко занурюють торцем у воду. Через 30 секунд їх виймають для огляду. Якщо температурний перепад становить 50 °C або менше, зразки можна занурювати у воду та виймати з неї разом із спеціальною касетою. Час, протягом якого зразок переноситься з печі до води, не повинен перевищувати 3 секунди при перепаді до 50 °C і 2 секунди при перепаді понад 50 °C.

Зразки, на яких з'явилися тріщини або інші ознаки руйнування, більше не використовуються для подальших випробувань. Зразки, що залишилися неушкодженими (без тріщин), перед кожним наступним нагріванням протирають, висушують і знову поміщають у піч. Температура нагрівання збільшується на 50 °С порівняно з попереднім етапом. Час витримки в печі скорочується до 15 хвилин, якщо температурний перепад перевищує 100 °С.

Випробування тривають до тих пір, поки не буде визначено мінімальний температурний перепад (Δt_m), при якому на кожному зразку з'являється тріщина.

Робочий температурний перепад (Θ_{op}) – це температурний перепад, який на 50 °С менший за максимальний перепад, при якому зразок не мав жодних ознак руйнування (тріщин тощо).

Формула для розрахунку:

$$\Theta_{op} = \Delta t_m - 50 \quad (2.7)$$

2.4. Дослідження властивостей дослідної кордієритової склокераміки

Склад досліджуваного низькотемпературного скла Cordierit-1 було обрано в евтектичній точці Е-1 магнійалюмосилікатної системи, (представленої на рисунку 2.3) і призначений для інтенсифікації спікання кордієритової кераміки. Цей склад характеризується мінімальною температурою утворення рідкої фази 1345 °С, причому в процесі подальшої спрямованої кристалізації розплаву в зазначеній точці фіксується виділення таких кристалічних фаз, як кордієрит, тридиміт (SiO_2) та кліноенстатит ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$).

За проведеним диференційно-термічним дослідженням (Рисунок 2.4) розм'якшення скла (T_{sp} , °С) Cordierit-1 проявляється у вигляді ендоефекту (мінімум при 760 °С) та екзоефекту кристалізації (T_c , °С) з максимумом при 990 °С.

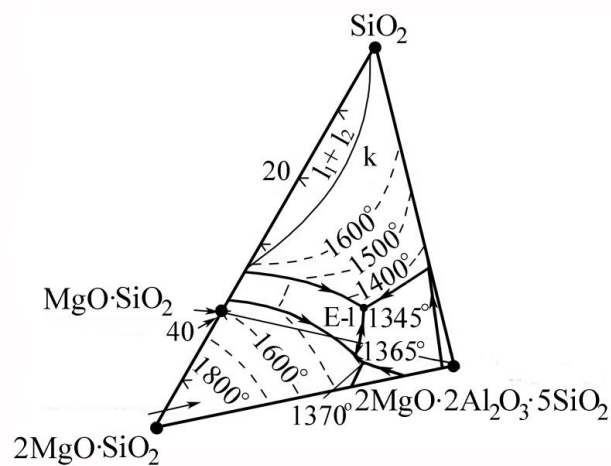


Рисунок 2.3 – Фрагмент діаграми стану системи $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ із зазначенням області полів кристалізації та складу дослідного скла Cordierit-1 [37]

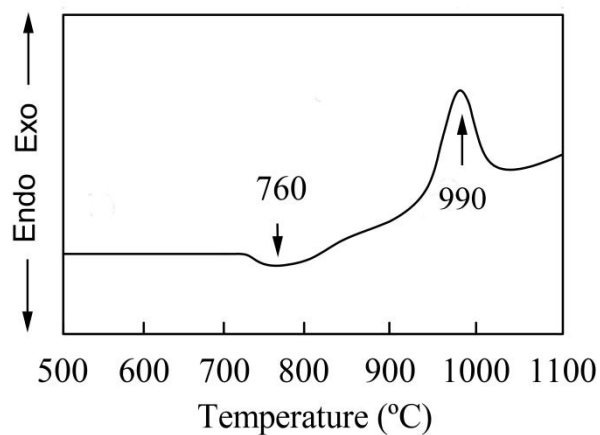


Рисунок 2.4 – Крива диференційно-термічного аналізу скла Cordierit-1

Дослідне скло Cordierit-1, характеризується властивостями, представленими в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Властивості скла Cordierit-1 та його хімічний склад

Назва скла	Оксидний склад скла				$T_{sp}, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\text{ТКЛР(СТЕ)} \times 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
	MgO	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2			
Cordierit-1	18,45	16,64	9,09	55,82	760	990	4,3

З метою ідентифікації якісного кристалофазового складу закристалізованого скла Cordierit-1 його піддавали ступінчастому нагріву з утриманням впродовж однієї години за температур розм'якшення та кристалізації. (табл. 2.1).

Кристалофазовий склад скла Cordierit-1 після термічної обробки на рисунку 2.5 переважно представлений β -кварцом ($d \cdot 10^{10} = 4,25; 3,34; 2,47; 1,55; 1,45; 1,38$ м) і кліноенстатитом ($d \cdot 10^{10} = 6,59; 3,52; 3,22; 3,11; 2,83; 2,47$ м). Кристалізація кордієритової фази за вказаних умов перебігає з низькою швидкістю. Про це свідчить незначна інтенсивність основних дифракційних рефлексів, які притаманні α -кордієриту при $d \cdot 10^{10} = 8,63; 3,93; 3,34; 3,11; 2,69; 1,95$ м.

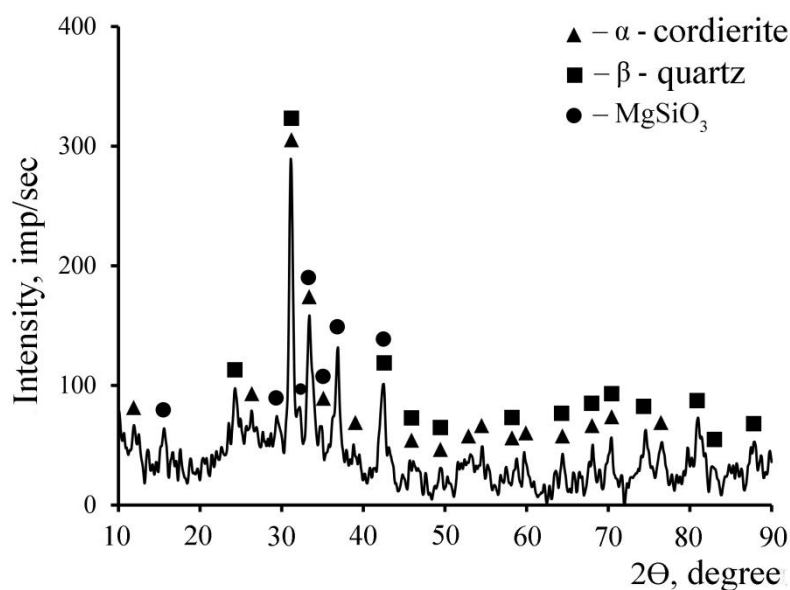
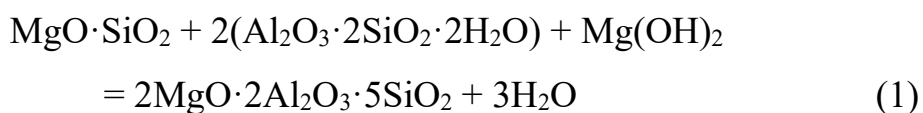


Рисунок 2.5 – Рентгенограма закристалізованого скла Cordierit-1

Рецептура кордієритової кераміки передбачала введення від 25 до 35 мас.% (крок – 5 мас.%) скла Cordierit-1, що відповідає складам C-1, C-2 і C-3. Присутні в продуктах кристалоутворення скла Cordierit-1, супутні фази – кліноенстатиту і тридиміту зв'язувалися у цільовий високотермостійкий кордієрит із низьким значенням температурного коефіцієнта лінійного

розширення (ТКЛР). У такий спосіб під час термічного оброблення дослідної кераміки завдяки модифікуванню склом Cordierit-1 частково реалізується технологічний принцип реакційного формування мікроструктури. Остаточний мінералогічний склад керамічної матриці формується внаслідок високотемпературної взаємодії продуктів Cordierit-1 з , як-от дегідратований каолінит, технічний глинозем та гідрооксид магнію (відповідно $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Al_2O_3 і $\text{Mg}(\text{OH})_2$). Дозування цих наповнювачів у вихідній шихті розраховували в кількостях, строго необхідних для повного зв'язування вільного кліноенстатиту й тридиміту в стехіометричний кордієрит.

Оскільки вихідна аморфна склофаза є термодинамічно нестійкою системою з високим запасом вільної енергії, її хімічна взаємодія з кристалічними компонентами протікає зі значно більшою інтенсивністю порівняно з кінетикою твердофазних реакцій між суто кристалічними сполуками. Синтез кордієритової фази за участю продуктів кристалізації магнійборалюмосилікатного скла Cordierit-1 та введених кристалічних наповнювачів здійснювався відповідно до наведених нижче хімічних рівнянь:



Решту оксидів Al_2O_3 та SiO_2 , необхідних для повного зв'язування компонентів у стехіометричний кордієрит, компенсували шляхом додаткового введення каолінового та кордієритового шамотів.

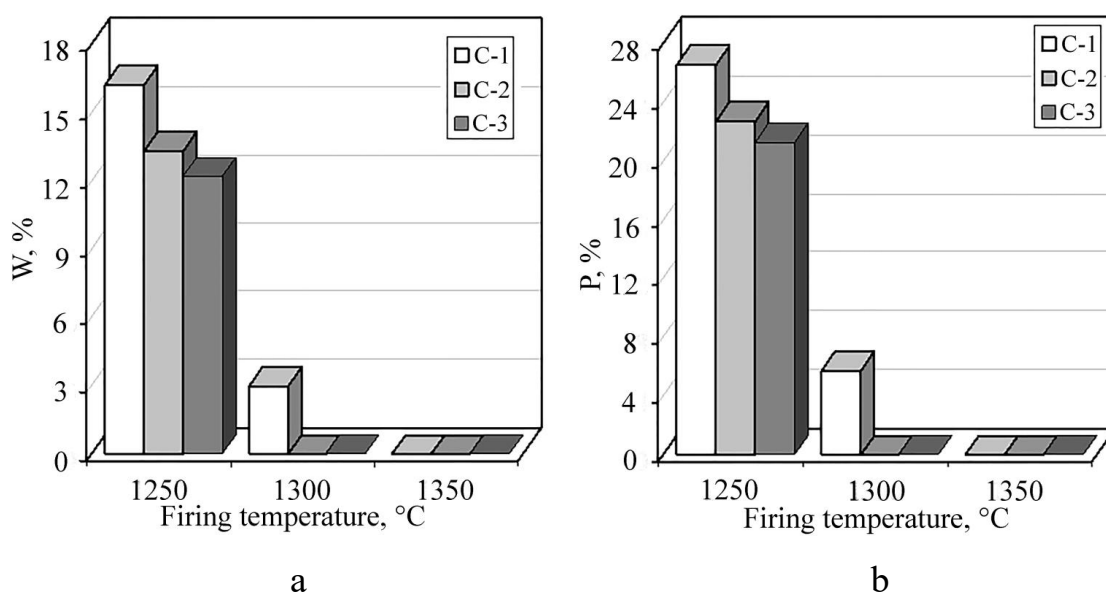
Хімічний склад розроблених кордієритових матеріалів (C-I-C-3) приведений в таблиці 2.2.

Випал досліджуваних складів кераміки зі склом Cordierit-1 проводили при максимальних температурах 1250-1350 °C з кроком в 50°C з ізотермічним витриманням впродовж 1 год.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад розробленої кордієритової кераміки (мас.%)

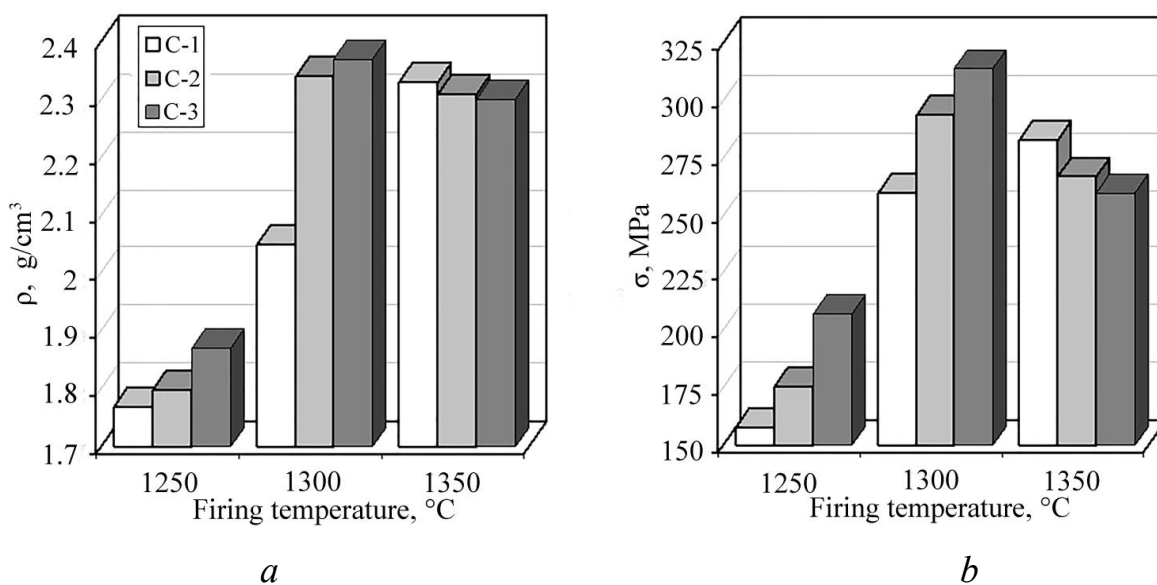
Sample №	Content of oxides			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	B ₂ O ₃
C-1	50,12	34,03	13,45	2,40
C-2	49,86	33,85	13,38	2,91
C-3	49,59	33,67	13,31	3,44

Експериментальні дані щодо фізико-технічних показників розробленої кордієритової кераміки наведено у формі графічних залежностей на рисунках 2.6 і 2.7.



а – водопоглинання; б – відкрита пористість кордієритової кераміки
Залежність фізико-механічних властивостей кордієритової кераміки від кількості скла Cordierit-1 та температури випалу: водопоглинання та відкритої пористості

Зростання температури випалювання до 1300°C для керамічних мас які містить скло Cordierit-1 в кількостях від 30 до 35 мас.%, до 1300°C забезпечує формування матеріалу з нульовою відкритою пористістю та відсутністю водопоглинання. Зважаючи на це, фіксується досягнення пікових значень уявної щільності (інтервал показників збільшується від 1,77–1,87 г/см³ до 2,34–2,37 г/см³) та границі міцності при стисненні (підвищення від 158–207 МПа до 294–314 МПа). Подальше зміщення температурного максимуму до 1350°C є доцільним тільки для маси *C-1* із найменшим вмістом добавки Cordierit-1. Синтезована кераміка володіє нульовими пористістю та водопоглинанням, а значення щільності й міцності локалізуються на рівні 2,33 г/см³ та 283 МПа (див. на рис. 2.6 та 2.7).



а – уявна щільність; б – межа міцності на стискання кордієритової кераміки

Рисунок 2.7 – Залежність фізико-механічних властивостей кордієритової кераміки від кількості скла Cordierit-1 та температури випалу: уявну щільність та межу міцності на стискання кордієритової кераміки

ТКЛР кордієритової кераміки практично не змінюється в межах температурного інтервалу випалу і вмісту скла Cordierit-1, які

досліджувались. Значення ТКЛР є низькими $(1,3-1,4) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, що має суттєве значення для створення високої термостійкості готових виробів.

Для зразків кордієритової кераміки, які мали найкращі фізико-технічні властивості, було досліджено діелектричні показники (тангенс кута діелектричних втрат та відносну діелектричну проникність). Також для цих складів визначили термічну стійкість (Θ_{op}) і вогнетривкість (R). Експериментальні дані випробувань представлено в таблиці 2.3.

Ключовими характеристиками радіопрозорих керамічних матеріалів надвисокочастотного (НВЧ) призначення є малі значення діелектричних втрат разом із низькою діелектричною проникністю в межах усього діапазону. Оскільки діелектричні властивості таких керамічних матеріалів залишаються стабільними у вказаному частотному спектрі, дослідження параметрів виконували на одній із базових робочих частот – 10 ГГц. Саме на цій частоті найчастіше експлуатуються готові вироби.

Таблиця 2.3 – Параметри електрофізичних властивостей (ϵ , $\tan\delta$), опору термічним ударам (Θ_{op}) та показники вогнетривкості (R) розроблених кордієритових матеріалів.

Sample №	Sintering temperature, $T_{вип}, ^\circ C$	Thermal and dielectric properties			
		ϵ	$\tan\delta$	$\Theta_{op}, ^\circ C$	$R, ^\circ C$
C-1	1350	4,3	0,001	900	1370
C-2	1300	4,3	0,001	900	1350
C-3	1300	4,3	0,001	900	1350

Дослідженнями доведено, що синтезовані кордієритові матеріали відзначаються низьким рівнем відносної діелектричної проникності, яка становить $\epsilon = 4,3$. Величина тангенса кута діелектричних втрат не виявляє

залежності від рецептури зразків і фіксується на позначці 0,001. Створена кераміка володіє високою стійкістю до теплових ударів $\Theta_{op} = 900^{\circ}\text{C}$, яка також залишається стабільною незалежно від компонентного складу матриці. Поряд із цим, розроблені композити характеризуються належними показниками вогнетривкості R . Зокрема, для матеріалів модифікації $C-I$, із мінімальною кількістю скла Cordierit-1 параметр R досягає 1370°C . Зростання вмісту скла Cordierit-1 зумовлює незначне зниження вогнетривкості до 1350°C .

Згідно з даними рентгенофазового аналізу (рисунки 2.8-2.10) якісний фазовий склад зразків, отриманих із введенням скла Cordierit-1, є монофазним і представлений виключно кордієритом. Завершення кристалоутворення модифікації α -кордієриту спостерігається вже за температури 1250°C . Про це свідчить висока інтенсивність основних дифракційних максимумів α -кордієриту, а також повна відсутність дифракційних піків сторонніх мінеральних складових.

Утворення кордієритової фази у складі синтезованої кераміки відбувається за рахунок кристалізації скла Cordierit-1, а також інтенсивної взаємодії його компонентів з кристалічними наповнювачами згідно з реакціями (1) і (2).

Збільшення концентрації добавки (скла Cordierit-1) від вихідних 25 мас.% ($C-I$) до 35 мас.% ($C-3$) спричиняє помітне послаблення інтенсивності головних рефлексів кордієриту (α -модифікація) після термообробки при 1250°C (див. рис. 2.8, рис. 2.10). Такий характер рентгенівської картини обумовлений накопиченням аморфної (скловидної) складової у досліджуваній системі, що чітко простежується за результатами сканувальної електронної мікроскопії (SEM) (рисунок 2.11 а і рисунок 2.12 а).

За даними SEM-аналізу мікроструктура зразків кераміки $C-I$, після термообробки при 1250°C , сформована кристалами кордієриту дрібної неправильної морфології. Середні лінійні розміри яких локалізуються в межах 0,5-1,0 мкм. Кристалічні зерна об'єднані між собою скловидною фазою, яка виконує роль зв'язуючого компонента (див. рис. 2.11 а).

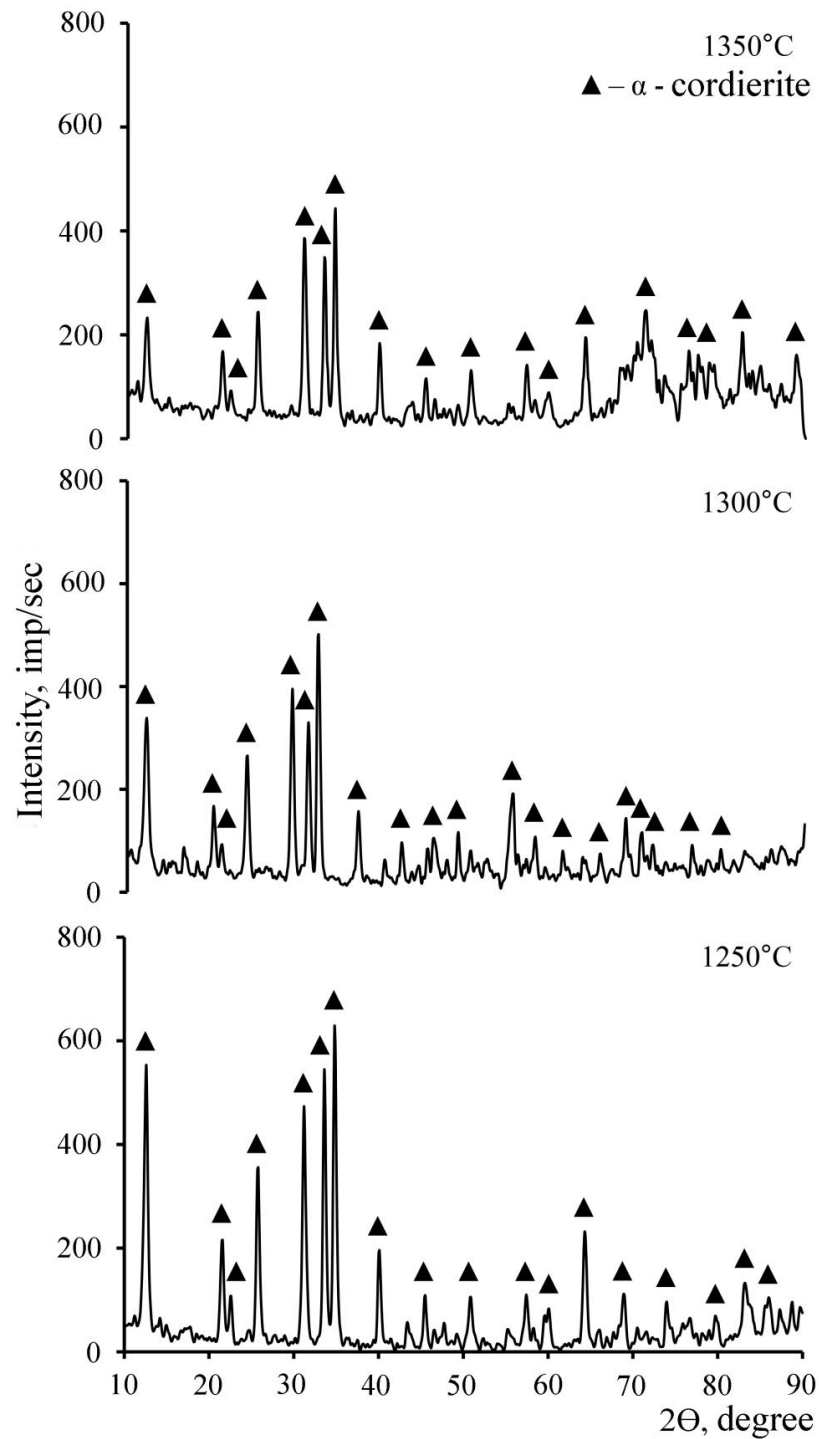


Рисунок 2.8 – РФА кераміки *C-1*

У разі досягнення максимального вмісту скла Cordierit-1 (35 мас.%) матриця матеріалу набуває вигляду ізотропної структури, збагаченої аморфною речовиною порівняно зі зразком (25 мас.%). У цьому випадку також ідентифікуються кристали кордієриту подібного дисперсного діапазону, як у випадку складу *C-1* (див. рис. 2.12, а). Водночас кількість та

в'язкотекучість скловидної фази, що утворюється при 1250°C, залишаються недостатній вплив для повного заповнення міжзернового простору. Унаслідок цього в матеріалі зберігається значна пористість. Основну частину становлять пори діаметром 2-5 мкм, хоча окремі порожнини досягають 9-10 мкм.

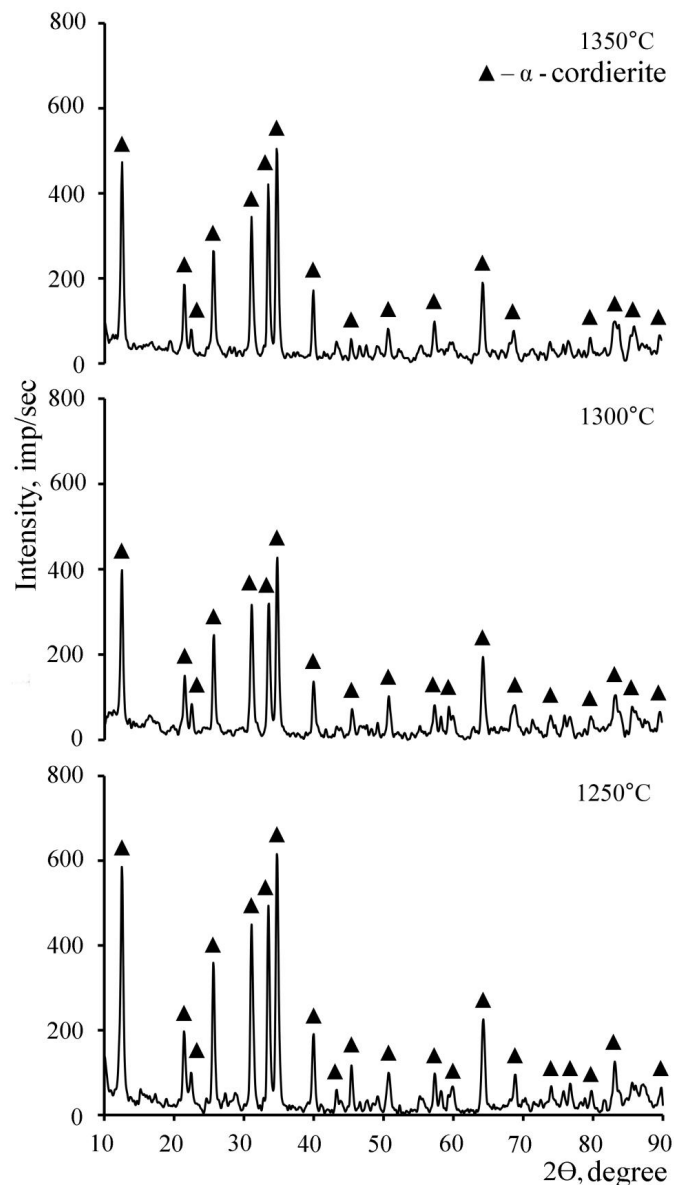


Рисунок 2.9 – РФА кераміки С-2

Спiкання кераміки С-3, С, при 1300°C забезпечує синтез гомогенної бездефектної мікроструктури. Її Мікроструктурна картина представлена рівномірно розподіленими плоскопризматичними кристалічними зростками

кордієриту три-, тетра- та пентагонального габітусу. Усі міжкристалічні порожнини повністю заповнені склоподібною матрицею (див. рис. 2.12, б). Домінантний розмір новоутворень становить 1-3 мкм, хоча фіксуються окремі кристали з граничний розмір яких може складати 4 мкм. Саме такий тип будови зумовлює формування найбільш оптимального комплексу фізико-механічних та експлуатаційних характеристик серед усієї серії дослідних складів.

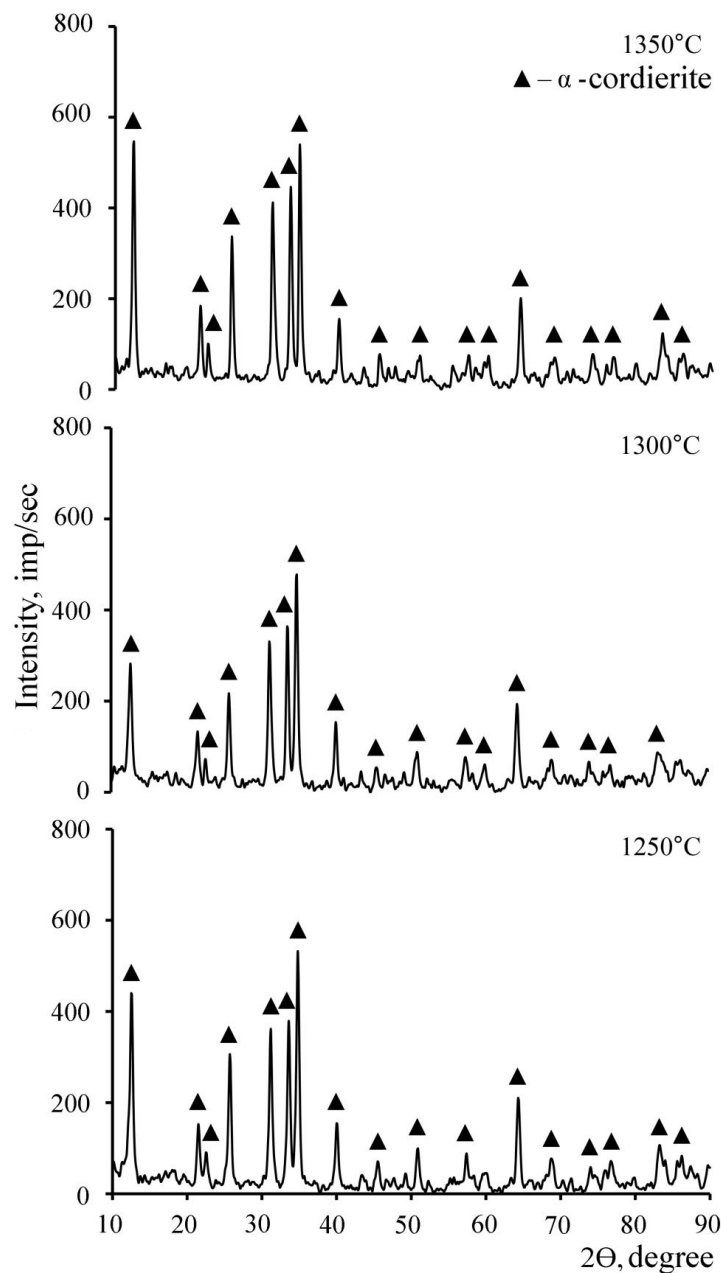
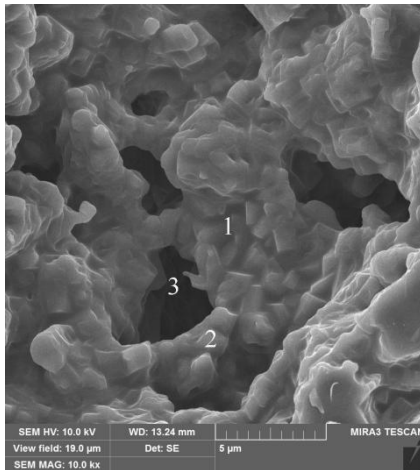
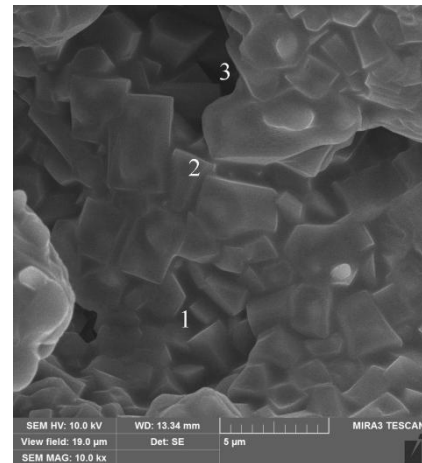
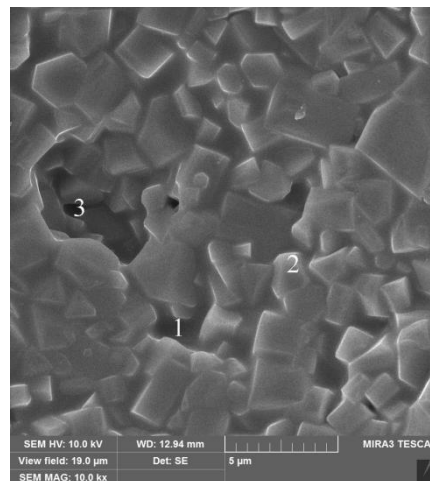


Рисунок 2.10 – РФА кераміки С-3

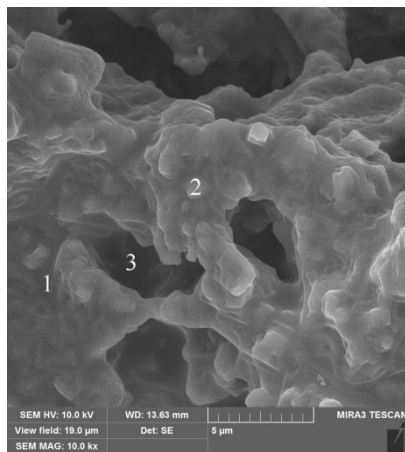
*a**b**c*

1 – скловидна фаза; 2 – кристали кордієриту; 3 – поровий простір;

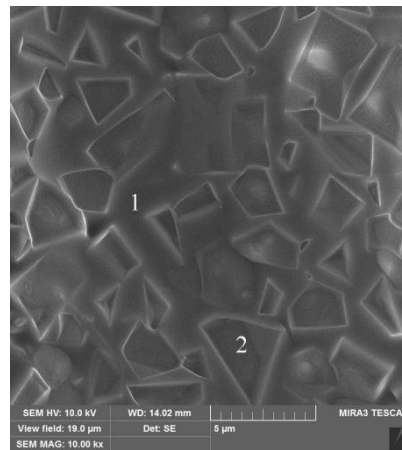
a – 1250°C, b – 1300°C, c – 1350°C;

Рисунок 2.11 – SEM складу C-1

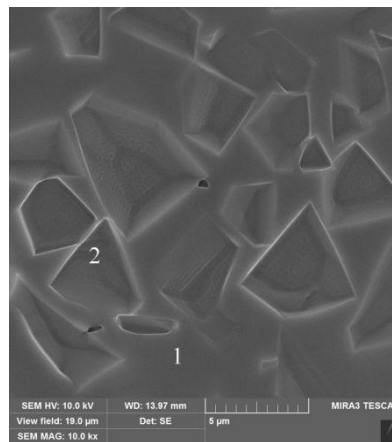
Для зразків C-1, який має найменший вміст скла Cordierit-1 підйом температурного випалу до 1350°C супроводжується подальшим падінням інтенсивності дифракційних піків кордієриту (рис. 2.8). Натомість для керамічних мас C-2 та C-3 зафіксовано протилежну тенденцію – посилення інтенсивності характерних рефлексів кордієритової фази зростає (див. рис. 2.9 і 2.10).



а



b



с

1 – скловидна фаза; 2 – кристали кордієриту; 3 – поровий простір;

а – 1250°C, б – 1300°C, с – 1350°C;

Рисунок 2.12 – SEM складу C-3

Для кордієритової кераміки *C-1*, випаленої при температурі 1350°C, за даними електронної мікроскопії (див. рис. 2.11 с) можна стверджувати про високий ступінь ущільнення структури з рівномірним розподілом дрібних кристалів. Кордієритові зерна набувають чіткої форми плоскопризматичних тетрагонів та гексагонів із лінійним розміром 1-2 мкм. Ці кристалічні фази є повністю сформованими та монолітно сполученими прошарками склофази.

На відміну від складу C-1, кераміка *C-3* за умов підняття температури випалювання до 1350 °C виявляє значну схильність до рекристалізації. Це явище супроводжується інтенсивним укрупненням зерен кордієриту та

зменшенням їх загальної чисельності. Окремі кристалічні індивіди за рахунок збиральної перекристалізації розростаються до 6 мкм (див. рис. 2.12, с). Розвиток внутрішніх мікронапружень та дефектності такої великокристалічної матриці призводить до суттєвого погіршення експлуатаційних характеристик: границя міцності на стиск падає до 260 МПа, а уявна щільність знижується до 2,30 г/см³ (відповідно до залежностей на рис. 2.7).

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Небезпечні та шкідливі фактори під час виконання дослідницької роботи

Охорона праці – система правових, соціально–економічних, організаційно-технічних, санітарно–гігієнічних і лікувальних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, працездатності людини і процесу трудової діяльності [25].

Дослідницька дипломна робота на тему: «Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорі кордієритової кераміки», проводилася у лабораторіях: П-326, П-8, 110 кафедри хімічних технологій кераміки, скла та біомедичних матеріалів (ХТКС та БМ).

Особливістю досліджуваного технологічного процесу є введення частини компонентів у вигляді евтектичного скла псевдопотрійної системи MAS, що дозволяє змістити температурний інтервал оптимального випалу (спікання α -кордієриту) до меж 1300-1350 °C. Тобто, попри зниження температурного максимуму порівняно з класичною технологією, дослідник усе одно піддається впливу високих температур (1300-1350 °C), високодисперсного пилу сировини, парів, газоподібних викидів та іонно-активних сполук (зокрема компонентів шлікерних електролітів та борної кислоти).

За своїм характером як небезпечні, так і шкідливі чинники виробничого середовища класифікують на чотири основні групи: фізичні, хімічні, психофізіологічні та біологічні.

До категорії хімічних загроз відносять різноманітні сполуки та речовини органічного й неорганічного походження [38]. Перелік сировинних матеріалів, які використовувалися при дослідженні, та їх характеристики наведені в табл. 3.1 згідно з [39].

Таблиця 3.1 – Характеристика застосованих сировинних матеріалів

Назва матеріалу	Характеристика шкідливої дії на організм людини	Клас небезпечності
Скло евтектичного складу	У дрібнодисперсному стані (пил) чинить фіброгенну дію на легені, викликає подразнення слизових оболонок верхніх дихальних шляхів та очей. За тривалого впливу можливий розвиток силікатузу.	4
Каолін збагачений	Належить до речовин із фіброгенним ефектом (аерозоль переважно фіброгенної дії). Пил викликає механічне та хімічне подразнення дихальних шляхів; тривалий вдих великих концентрацій може призвести до силікозу.	4
Тальк	Має помірну фіброгенну дію. Пил викликає подразнення слизових оболонок дихальних шляхів. Тривалий хронічний вплив пилу тальку без засобів захисту може спричинити специфічне захворювання легень – талькоз.	4
Маршаліт (кремній діоксид)	Високодисперсний пил кварцу. Має виражену фіброгенну дію. Глибоко проникає в легені, викликаючи важке невиліковне професійне захворювання – силікоз. Сильний подразник для очей та дихальної системи.	3
Борна кислота	Загальнотоксична речовина. Чинить кумулятивну дію (накопичується в організмі). Подразнює шкіру та слизові оболонки. При потраплянні всередину або через ушкоджену шкіру вражає нирки, печінку та нервову систему.	3
Електроліт	Має слабку або помірну лужну реакцію. Викликає хімічне подразнення або легкі опіки слизових оболонок очей, верхніх дихальних шляхів (при інгаляції аерозолі) та знежирює шкіру рук.	3 або 4 (залежно від концентрації)
Гідрооксид магнію	Малотоксична сполука. У вигляді пилу чинить слабку подразнювальну дію на слизові оболонки носоглотки та очей. При потраплянні в шлунок у великих кількостях діє як проносне, але системної токсичності не виявляє.	4

До фізичних небезпек та шкідливостей, які потенційно можуть чинити вплив на персонал у процесі проведення експериментальних досліджень, належать:

- рухомі елементи та вузли лабораторного або дослідно-промислового устаткування;
- критичні рівні напруги в електричній мережі, що створюють загрозу проходження струму через організм людини;

- невідповідність параметрів мікроклімату (інтенсивний рух повітряних мас або його застій);
- температурні відхилення від норми (перегрів або переохолодження повітряного середовища в межах робочої зони);
- наявність гострих крайок, задирок та значна шорсткість робочих поверхонь інструментарію та обладнання;
- незадовільний рівень освітленості дослідного простору;
- виконання технологічних операцій на висоті відносно базового рівня підлоги.

Оцінка ключових професійних ризиків з урахуванням специфіки синтезу розробленої кордієритової кераміки наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Професійні ризики під час виконання досліджень та заходи з їх мінімізації

Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело виникнення за технологією дослідження	Наслідки впливу на організм	Заходи безпеки та технічного захисту
Дрібнодисперсний силікатний пил	Пил каоліну збагаченого, тальку, маршаліту, борної кислоти та здрібненого евтектичного скла MAS	Ризик розвитку силікозу, силікатозу (каолінозу, талькозу) та ХОЗЛ	Впровадження вологих і вакуумних методів дроблення скла. Зважування та завантаження сировини у витяжних шафах із використанням респіраторів класу FFP3.
Хімічно активні речовини та аерозолі	Борна кислота (загальнотоксична дія), лужні компоненти електроліту шлікеру	Подразнення шкіри рук, слизових оболонок очей та носоглотки; кумулятивний ефект	Обов'язкове використання гумових або нітрилових рукавиць, захисних окулярів та лабораторних халатів під час приготування шлікерів.

Продовження таблиці 3.2

Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело виникнення за технологією дослідження	Наслідки впливу на організм	Заходи безпеки та технічного захисту
Теплове випромінювання та газу	Лабораторні печі під час випалу (1300–1350 °C), газу	Термічні опіки, тепловий стрес, гострі отруєння чадним газом	Облаштування локальної витяжної вентиляції над печами. Застосування термостійких захисних щитків, рукавиць-краг; дотримання графіку чергувань біля печей.
Механічні травми	Етап формування виробів складної геометрії, пресування, транспортування	Забої, здавлювання тканин, порізи гострими краями спеченого матеріалу	Дотримання інструкцій з охорони праці під час роботи на пресах та шліфувальним кругом; використання захисних рукавиць.
Високий рівень шуму	Робота помольного та шліфувального обладнання (рівень шуму в лабораторії до 75 дБ)	Нервові та серцево-судинні захворювання, виразкова хвороба, порушення обміну речовин, зниження слуху	Застосування засобів індивідуального захисту органів слуху (протишумні навушники або беруші), обмеження часу роботи обладнання.
Недостатність природного світла	Розташування лабораторного приміщення кафедри у підвальному корпусі університету	Хронічне втомлювальне травмування зору, зниження працездатності, короткозорість	Організація постійного комбінованого штучного освітлення (загального та місцевого над робочими зонами) люмінесцентними лампами відповідно до санітарних норм
Рухомі частини машин та механізмів	Приводи та робочі органи кульового млина, шліфувального круга або пресу	Механічні травми різного характеру та ступеня тяжкості (забої, защемлення, переломи)	Наявність захисних кожухів та огорожень на рухомих вузлах; суворе дотримання правил пуску та інструкцій з експлуатації машин.

3.2 Оцінка пожежовибухонебезпеки

Пожежна безпека – галузь знань, яка стосується всіх працівників лабораторії, дотримання її правил допоможе зберегти майно і людські життя.

Забезпечення пожежної безпеки реалізується через комплекс організаційних дій та інженерно-технічних рішень. Вони спрямовані на локалізацію ризиків спалаху, захист персоналу, мінімізацію матеріальних збитків, обмеження шкідливого впливу на довкілля в разі аварії, а також на створення належних умов для швидкої ліквідації вогню.

Серед потенційних чинників, здатних спровокувати вибух або пожежу в лабораторних приміщеннях під час проведення експериментів, слід виділити: самозаймання летких чи легкозаймистих сполук, ігнорування нормативних регламентів безпеки, порушення правил роботи з електроустановками та виникнення коротких замикань. Оскільки пожежна безпека є базовою дисципліною для всього колективу установи, неухильне дотримання її вимог є запорукою збереження матеріальних цінностей та життя людей.

Відповідно до вимог ДСТУ 2272:2006 [40] та НАПБ А.01.001-2014 [41], захист об'єкта від вогню базується на трьох взаємопов'язаних елементах:

- системі попередження (запобігання) пожеж;
- комплексі активного протипожежного захисту;
- організаційно-технічних заходах.

Підбір первинного пожежного інвентарю здійснюють з урахуванням фізико-хімічних та пожежонебезпечних параметрів використовуваних реактивів, специфіки їх взаємодії з різними вогнегасними речовинами, а також геометричних розмірів приміщення. Нормативна кількість засобів пожежогасіння розраховується індивідуально для кожної кімнати. Якщо в межах одного незалікованого капітальними протипожежними перегородками простору виконуються процеси з відмінними категоріями пожежної

небезпеки, його укомплектовують вогнегасниками та супутнім реманентом за найбільш суворими вимогами.

Розміщення вогнегасників передбачається у візуально помітних і безперешкодно доступних зонах, насамперед поблизу ділянок із підвищеною ймовірністю займання. Водночас обов'язковою умовою є їх ізоляція від теплового випромінювання опалювальних контурів та прямих сонячних променів.

До базових протипожежних вимог, що висуваються до лабораторій технологічного профілю, належать:

- обов'язкова наявність функціонуючих мереж водопостачання та водовідведення;
- облаштування ефективної примусової витяжної вентиляції;
- оснащення робочих місць засобами первинного пожежогасіння, включаючи вуглекислотні вогнегасники, а також спеціальні ємності з піском та інвентарем для його засипання.

2.3 Профілактичні заходи з охорони праці в лабораторіях

Для захисту від впливу шкідливих і небезпечних чинників під час виконання робіт працівник повинен користуватися спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту згідно з чинними нормами. У разі виявлення аварійної ситуації необхідно:

- при її виникненні терміново знеструмити електроспоживачів за допомогою загального рубильника, огородити зону небезпеки, запобігти доступу до неї сторонніх осіб та доповісти про інцидент безпосередньому керівнику робіт. Під час передачі інформації чітко вказати точне місце події, пояснити оптимальні маршрути під'їзду, організувати зустріч аварійної спецмашини та забезпечити виведення людей із небезпечної зони;

- при виникненні пожежі негайно викликати службу пожежної охорони за телефоном 101 і розпочати ліквідацію осередку займання наявними первинними засобами пожежогасіння;
- за наявності потерпілих надати їм першу невідкладну допомогу та викликати бригаду швидкої медичної допомоги за телефоном 103.

ВИСНОВКИ

Встановлено можливість одержання відносно низькотемпературного (1300-1350°C) щільноспеченого кордієритового матеріалу із залученням евтектичного компонента (скла) псевдопотрійної системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (MAS). У розробленому матеріалі ідентифікується лише одна кристалічна фаза – α -кордієрит, що виконує роль головного структурного елемента внаслідок кристалізації скла Cordierit-1 та його інтенсивної взаємодії з наповнювачами. Єдиною кристалічною фазою розробленого матеріалу є α -кордієрит, який формує структурну матрицю внаслідок кристалізації скла Cordierit-1 та його інтенсивної взаємодії з наповнювачами. Кристали мають форму плоских призм правильної огранки розміром 1-3 мкм, а проміжки між ними повністю заповнені склофазою, що забезпечує міцне зчеплення зерен, однорідність та високу щільність мікроструктури.

Отриманий матеріал має нульові значення водопоглинання та відкритої пористості, максимальну межу міцності на стиск 314 МПа, число вогнетривкості в діапазоні від 1350 до 1370 °C та низький ТКЛР $(1,3\text{--}1,4) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, чим гарантується значний опір термічним ударам (900°C). Поєднання значення відносної діелектричної проникності (4,3) та мінімальних діелектричних втрат ($\text{Tan}\delta = 0,001$ або $1,0 \cdot 10^{-3}$) дозволяє позиціонувати дану кераміку як таку, що цілком відповідає критеріям для сучасних високочастотних радіопрозорих конструкцій.

Реологічні та технологічні параметри досліджених шлікерів забезпечують можливість формування об'єктів складної просторової конфігурації за класичними промисловими методиками. Отримані результати дозволяють демонструють високу технологічну гнучкість. Сам же підхід є високоперспективним для інтеграції в технологічні процеси одержання суміжних алюмосилікатних керамічних матеріалів ширшого спектра технічного використання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tropf, W.J., Harris, T.J., Thomas, M.E., 2000. *Electro-Optics Handbook*, second ed. McGraw-Hill.
2. Синтетичний кордієрит та вироби на його основі / В. М. Павліков, Є. П. Гармаш // Науково-технічні розробки Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України : каталог. – Київ : ІПМ НАН України, 2015. – С. 83–93. – URL: http://www.materials.kiev.ua/productions/04/sc_ua.pdf (дата звернення: 20.05.2026).
3. Технологія виробництва радіопрозорих керамічних матеріалів / Г. В. Лісачук, Р. В. Кривобок, В. В. Волощук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2023. – № 2 (16). – С. 63–70. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.02.09>
4. Radio-transparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition / A. V. Zaichuk, A. A. Amelina, Y. V. Karasik, Y. S. Khomenko, V. A. Lementareva, D. Yu. Saltykov // *Functional Materials*. – 2019. – Vol. 26, No. 1. – P. 174–181. – DOI: <https://doi.org/10.15407/fm26.01.174>.
5. Suzdal'tsev E. I., Rozhkova T. I. Materials with Controlled Dielectric Constants Based on a Glass Ceramic of Lithium Alumina-Silicate Composition // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2003. – Vol. 44, No. 4. – P. 260–262. – DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1027343818027>.
6. Narang S. B., Shalini B. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: a review // *Journal of Ceramic Processing Research*. – 2010. – Vol. 11, No. 3. – P. 316–321.
7. Wuchina E. UHTCs: Ultra-High Temperature Ceramic Materials for Extreme Environment Applications. / E. Wuchina, E. Opila, M. Opeka , W. Fahrenholtz, I. Talmy // *The Electrochemical Society Interface*. – 2007. – Vol. 16 – P. 30.

8. MatWeb [Електронний ресурс] // Online Materials Information Resource. URL: <https://www.matweb.com>

9. Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design / D. W. Richerson, W. E. Lee. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2018. – 710 p.

10. Пат. 6091375 США, Int. Cl.7 B 64 C 1/14. Radome / Tomoji Goto, Akihito Fujii, Chihiro Kawai; заявник і власник Sumitomo Electric Industries, Ltd. – заявл. 24.06.1997; опубл. 18.07.2000. – 5 с.

11. Саввова О. В. Хімічні технології архітектурно-будівельної та технічної кераміки : конспект лекцій для студентів 1 курсу денної форми навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / О. В. Саввова, Г. К. Воронов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 97 с. URL:

<https://eprints.kname.edu.ua/55730/1/2020%20%D0%BF%D0%B5%D1%87.%2051%D0%9B.pdf>

12. ДСТУ 2267-93. Вироби електротехнічні. Терміни та визначення. [Діє від 01.01.1995]. Вид. Міністерство машинобудування, військово-промислового комплексу і конверсії України. 1993. 21с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60389

13. Електротехнічна кераміка на основі алюмосилікатів лужних та лужноземельних металів : монографія / Г.В. Лісачук, О.Ю. Федоренко, Р.В. Кривобок, К.Б. Богданова, А.В. Захаров. – Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 200 с.

14. Теоретичні і технологічні принципи отримання радіопрозорих керамічних матеріалів у системі $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ / А. В. Захаров, Р. В. Кривобок, Г. В. Лісачук, О. Ю. Федоренко, О. С. Рябінін, М. С. Приткіна // Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного». – 2015. – № 115. – С. 9.

15. Ogiwara T., Noda Y., Shoji K., Kimura O. Low-temperature sintering of high-strength β -eucryptite ceramics with low thermal expansion using $\text{Li}_2\text{O-GeO}_2$

as a sintering additive // *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. Vol. 94, № 5. P. 1427–1433. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.04279.x.

16. Xia L., Wen G., Song L., Wan X. The crystallization behavior and thermal expansion properties of β -eucryptite prepared by sol–gel route // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 119, Iss. 3. P. 495–498. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.10.003

17. Презентація [Електронний ресурс]. URL: <https://www.scribd.com/presentation/754759260/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F> (дата звернення: 25.05.2026).

18. Sung, Y.M. Influence of various heating procedures on the sintered density of Sr-celsian glass-ceramic [Text] / Y.M. Sung, W.C. Kwak // *Journal of materials science letters*. – 2002. – Vol. 21, № 11. P. 841–843.

19. Ptáček, P. The formation of feldspar strontian ($\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) via ceramic route: Reaction mechanism, kinetics and thermodynamics of the process [Text] / P. Ptáček, F. Šoukal, T. Opravil, E. Bartoníčková, J. Wasserbauer // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, № 7. – P. 8170–8178.

20. López-Badillo, C.M. Synthesis and characterization of $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ using mechanically activated precursor mixtures containing coal fly ash [Text] / C.M. López-Badillo, J. López-Cuevas, C.A. Gutiérrez-Chavarría, J.L. Rodríguez-Galicia, M.I. Pech-Canul // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 33, № 15–16. – P. 3287–3300.

21. Anjuraizah J. Crystal structure of single phase and low sintering temperature of α -cordierite synthesized from talc and kaolin / J. Anjuraizah, H. Mohamad, Z. A. Ahmad // *J. Alloys Compd.* – 2009. – № 482. – P. 429–436.

22. Shamsudin, Z. Characterisation of thermo-mechanical properties of $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass ceramic with different heat treatment temperatures. [Text] / Z. Shamsudin, A. Hodzic, C. Soutis [et al.] // *Journal of materials science*. – 2011. – Vol. 46, № 17. – P. 5822–5829.

23. Failure Analysis on Silicon Semiconductor Device Materials: Optical and High-resolution Microscopic Assessments / S. C. B. Gopinath, S. Ramanathan, M. N. M. Yasin [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 21. – P. 3451–3461. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.116>.

24. Нові типи склокерамічних матеріалів для електронних систем / О. В. Саввова, О. І. Фесенко, М. І. Тимошук, В. Б. Білоус, А. В. Скрипинець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2025. – № 1. – С. 84–90. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.01.12>.

25. Племянніков, М. М. Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів [Електронний ресурс] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізацією «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів» / М. М. Племянніков, Н. В. Жданюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,14 Мбайт). – Київ : «Освіта України», 2022. – 152 с. – Назва з екрана. – URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48908>

26. Технологічні особливості отримання радіопрозорої кераміки на основі славсоніту / [Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, В.В. Волощук] // Publishing House “Baltija Publishing”. – 2022. – С. 85-101. – DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-219-7-4>.

27. Influence of aluminum-containing raw materials on the properties of radio-transparent materials / [K.V. Bilohubkina, O.Yu. Fedorenko, G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, A.V. Zakharov] // Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. – 2023. – №75. – P. 84-87. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.12>

28. Glass and ceramics based hightemperature composite materials for use in aviation technology / [E.N. Kablov, D.V. Grashchenkov, N.V. Isaeva, S.S. Solntsev, V.G. Sevast'yanov] // Glass and Ceramics. – 2012. – Vol. 69 (3-4). – P. 109–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10717-012-9425-1>

29. Solid-state synthesis of ceramics in the BaO–SrO–Al₂O₃–SiO₂ system / [Y.-P. Fu, C.-C. Chang, C.-H. Lin, T.-S. Chin] // *Ceramics International - CERAM INT.* – 2004. – №30. – P. 41-45. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(03\)00059](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(03)00059)

30. Exothermic synthesis of ceramic materials based on barium and strontium aluminosilicates / [K.B. Podbolotov, A.T. Volochko, G.V. Lisachuk, R.V. Krivobok, V.V. Voloshchuk] // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* – 2021. – №6. – P. 57-64. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-139-6-57-64>.

31. Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів [Текст] : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів» / М.М. Племянніков, Н.В. Жданюк; . – К. : «Освіта України», 2022. – 152 с.

32. Будников, П.П. Химическая технология керамики и огнеупоров [Текст]// П.П. Будников, В.Л. Балкевич, А.С. Бережной, И.А. Булавин, Г.В. Куколев, Д.Н. Полубояринов, Р.Я. Попильский// Издательство литературы по строительству. – Стройиздат. – 1972. – С 329 – 330.

33. Chaynikova, A.S. Technological aspects of fabrication of radiotransparent glass-ceramic materials based on high-temperature aluminosilicate systems (review) [Text] / A.S. Chaynikova, M.L. Vaganova, N.E. Shchegoleva, Yu.E. Lebedeva // *Proceedings of VIAM.* – 2015. – № 11. – P. 26–39.

34. Stoch, L. Mechanisms of crystal structure organization in magnesium aluminosilicate glass: HREM and analytical study [Text] / L. Stoch, J. Lelatko // *European Journal of Glass Science and Technology. Part A.* – 2008. – Vol. 49, № 4. – P. 183–188.

35. Guignard, M. Environment of titanium and aluminum in a magnesium alumino-silicate glass [Text] / M. Guignard, L. Cormier, V. Montouillout [et al.] // *Journal of Physics: Condensed Matter.* – 2009. – Vol. 21, № 1–10.

36. Технологія виготовлення керамічних виробів методом лиття шлікера у форму: методичний посібник / С.Ю. Кондратюк. – Черкаси: КНЗ

«ЧОППОПП ЧОР», 2017. – 28 с. <http://library.ippro.com.ua>

37. Gasparik T. System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Gasparik T. Phase Diagrams for Geoscientists. New York : Springer, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5776-3_3.

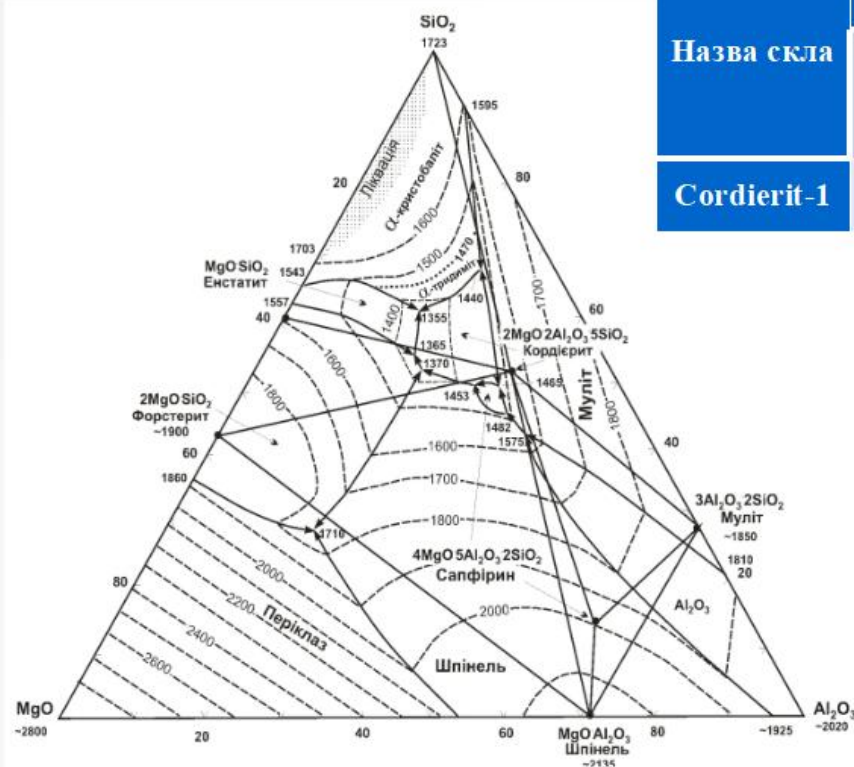
38. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Служба Охорони Праці : Експертус Безпека праці. URL: <https://pro-op.com.ua/article/206-qqq-16-m6-13-06-2016-nebezpechn-ta-shkdliiv-virobnich-faktori>

39. ДСП 2.2.1-011-99. Державні санітарні правила для підприємств по виробництву цементу, скла, кераміки та вогнетривів. – Київ: МОЗ України, 1999.

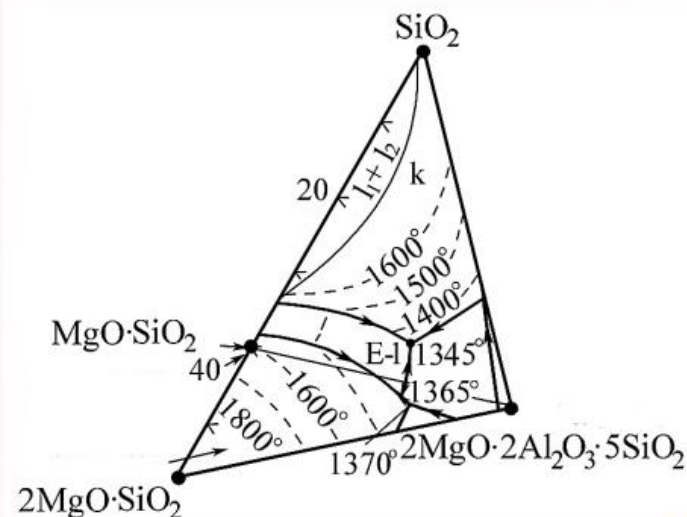
40. ДСТУ 2272:2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. – Введ. 01.01.2007.

41. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – Введ. 01.01.2015.

ДІАГРАМА ТРИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД СКЛА

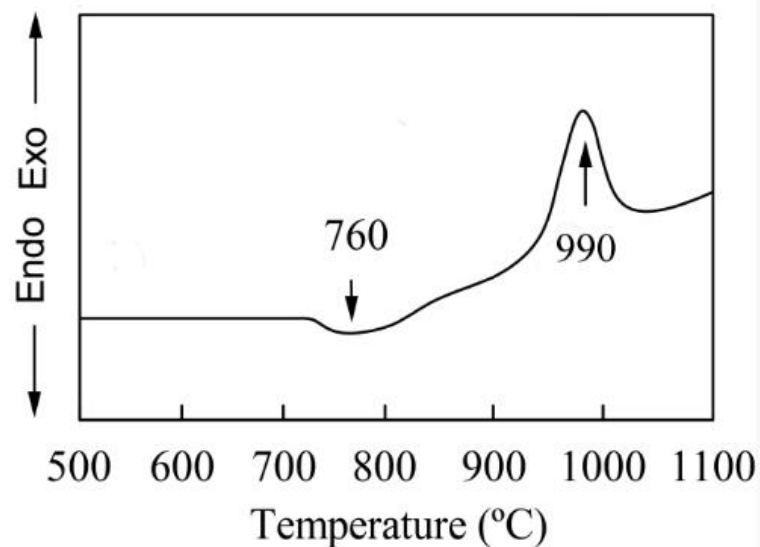


Назва скла	Оксидний склад скла				$T_{sp},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{cr},$ $^{\circ}\text{C}$	ТКЛР(СТЕ) $\times 10^{-7},$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	MgO	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2			
Cordierit-1	18,45	16,64	9,09	55,82	760	990	43



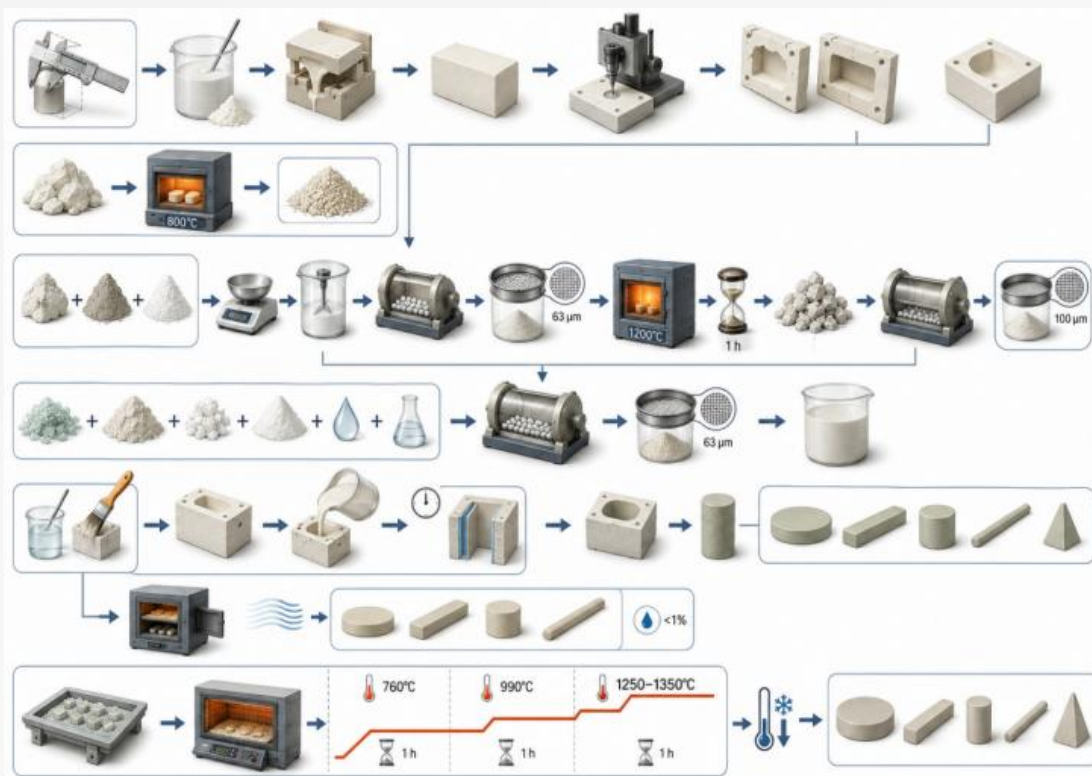
					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ			
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата				
Розроб.	Палько Д.Г.				Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії кордієритової кераміки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір	Калішенко Ю.Р						65	80
						ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		
Н. Контр.	Калішенко Ю.Р							
Зав.каф.	Зайчук О.В.							

СХЕМА ПІДГОТОВКИ ЕВТЕКТИЧНОГО СКЛА ДЛЯ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ ТА ДИФЕРЕНЦІЙНО- ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ СКЛА CORDIERIT-1



					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ			
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата				
Розроб.	Палько Д.Г.				Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії кордієритової кераміки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір	Калішенко Ю.Р						67	80
						ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		
Н. Контр.	Калішенко Ю.Р							
Зав.каф.	Зайчук О.В.							

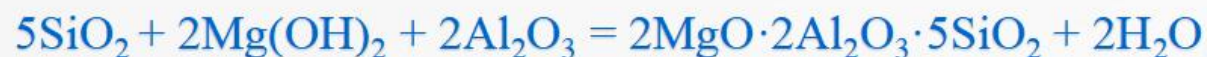
ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД РОЗРОБЛЕНОЇ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ (МАС.%)



Sample№	Content of oxides			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	B ₂ O ₃
C-1	50,12	34,03	13,45	2,40
C-2	49,86	33,85	13,38	2,91
C-3	49,59	33,67	13,31	3,44

					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ			
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата				
Розроб.		Палько Д.Г.			Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії кордієритової кераміки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір		Калішенко Ю.Р					69	80
						ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		
Н. Контр.		Калішенко Ю.Р						
Зав.каф.		Зайчук О.В.						

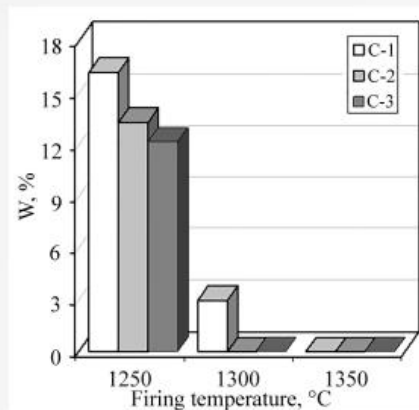
Синтез кордієритової фази за участю продуктів кристалізації скла Cordierit-1 та введених кристалічних наповнювачів здійснювався відповідно до наведених нижче хімічних рівнянь:



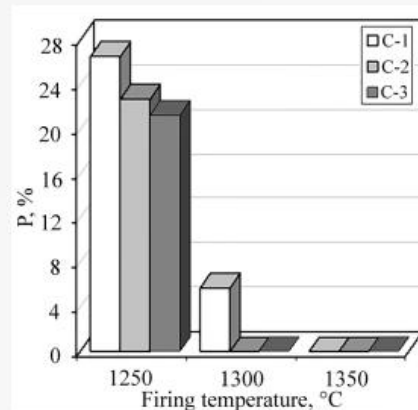
Решту оксидів Al_2O_3 та SiO_2 , необхідних для повного зв'язування компонентів у стехіометричний кордієрит, компенсували шляхом додаткового введення каолінового та кордієритового шамотів.

					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ			
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата				
Розроб.		Палько Д.Г.			Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії кордієритової кераміки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір		Калішенко Ю.Р					71	80
						ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		
Н. Контр.		Калішенко Ю.Р						
Зав.каф.		Зайчук О.В.						

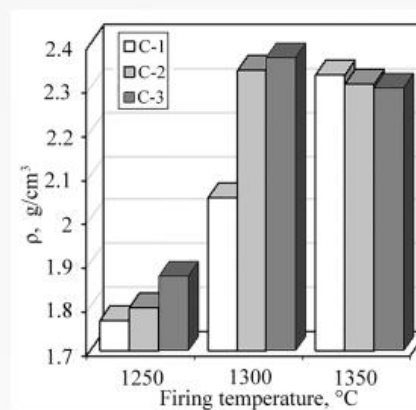
Залежності фізико-механічних властивостей кордієритової кераміки від кількості скла Cordierit-1 та температури випалу



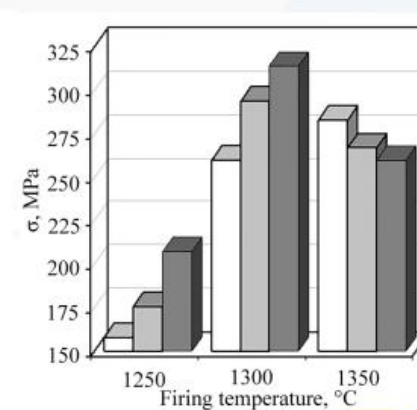
Водопоглинання



Відкрита пористість
кордієритової кераміки



Уявна щільність



Межа міцності на стискання
кордієритової кераміки

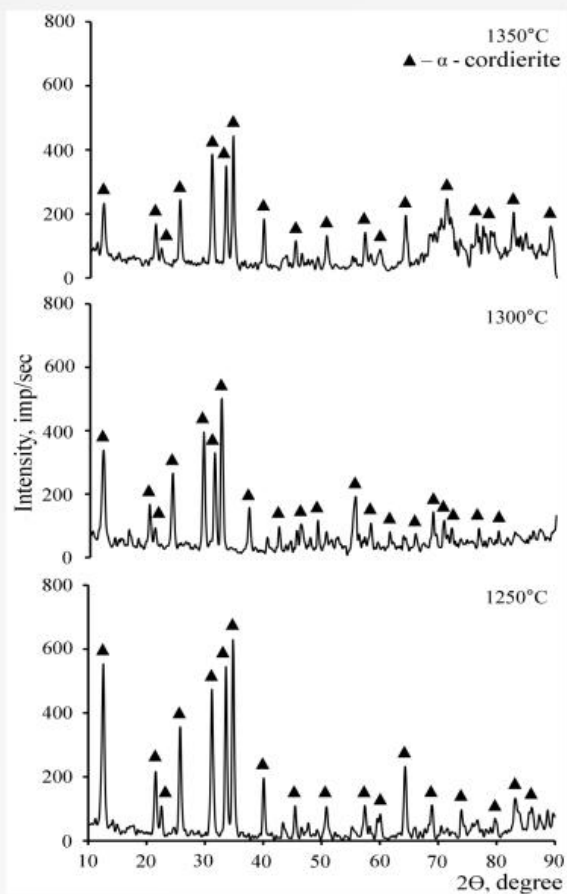
					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ			
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата				
Розроб.		Палько Д.Г.			Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії кордієритової кераміки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір		Калішенко Ю.Р					73	80
						ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		
Н. Контр.		Калішенко Ю.Р						
Зав.каф.		Зайчук О.В.						

Параметри електрофізичних властивостей (ϵ , $\text{tg}\delta$), опору термічним ударам (Θ_{op}) та показники вогнетривкості (R) розроблених кордієритових матеріалів

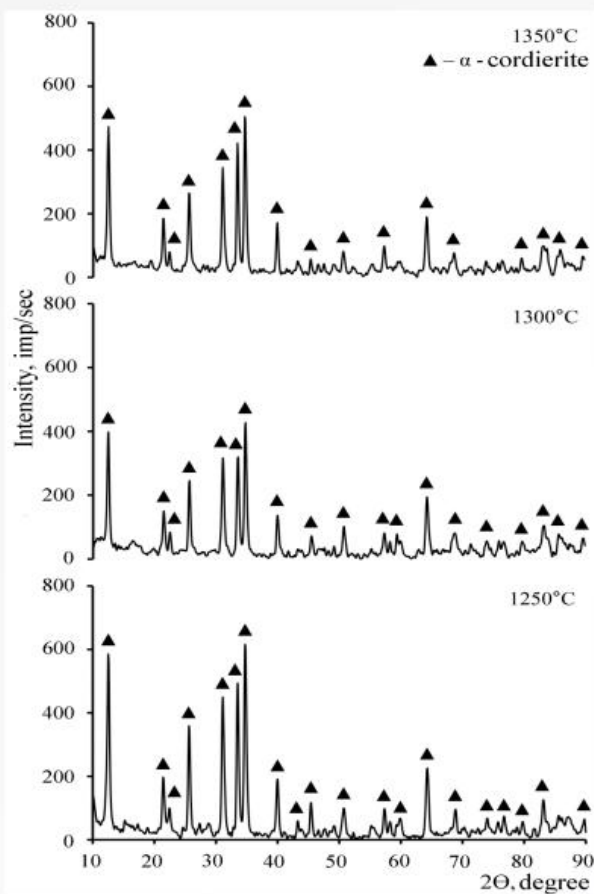
Sample№	Sintering temperature, $T_{\text{вип}}, ^\circ \text{C}$	Thermal and dielectric properties			
		ϵ	$\text{Tan}\delta$	$\Theta_{\text{op}}, ^\circ \text{C}$	$R, ^\circ \text{C}$
C-1	1350	4,3	0,001	900	1370
C-2	1300	4,3	0,001	900	1350
C-3	1300	4,3	0,001	900	1350

					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ			
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата				
Розроб.	Палько Д.Г.				Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорії кордієритової кераміки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір	Калішенко Ю.Р						75	80
						ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53		
Н. Контр.	Калішенко Ю.Р							
Зав.каф.	Зайчук О.В.							

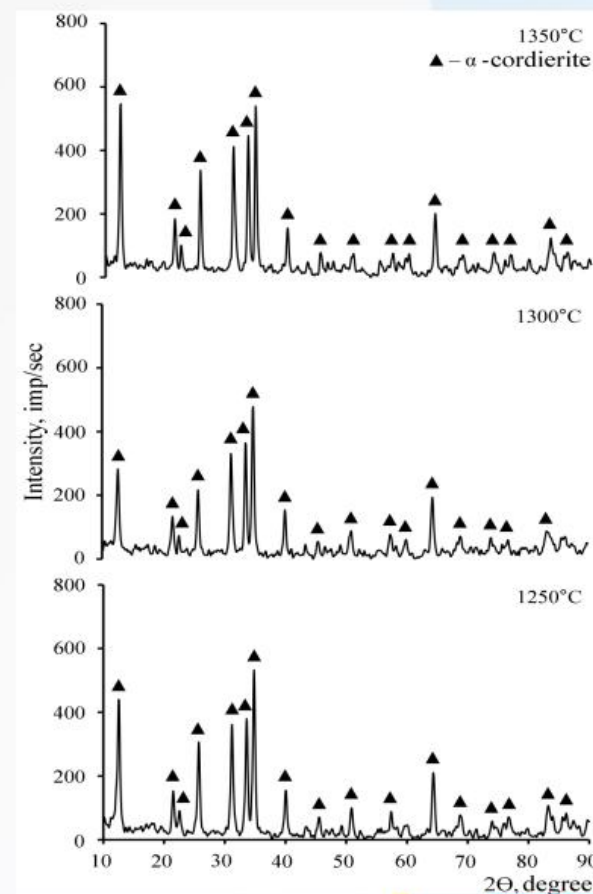
РЕНГТЕНОФАЗОВИЙ АНАЛІЗ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ



РФА кераміки C-1



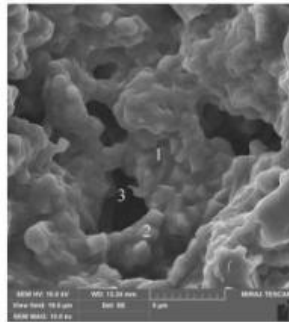
РФА кераміки C-2



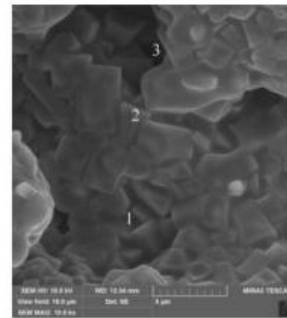
РФА кераміки C-3

					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ								
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата									
Розроб.		Палько Д.Г.			Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорої кордієритової кераміки				Літ.		Арк.	Аркушів	
Перевір		Калішенко Ю.Р									77	80	
									ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53				
Н. Контр.		Калішенко Ю.Р											
Зав.каф.		Зайчук О.В.											

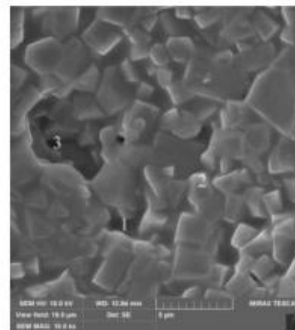
МІКРОСТРУКТУРА ЗРАЗКІВ КОРДІЄРИТОВОЇ КЕРАМІКИ



a



b

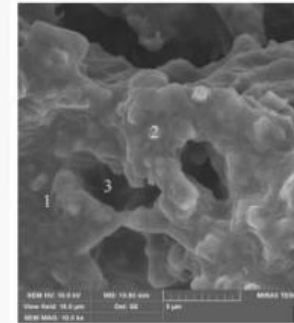


c

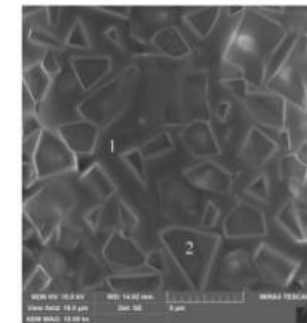
1 - склофаза; 2 - кордієрит; 3 - пора;

а - 1250°C, б - 1300°C, с - 1350°C;

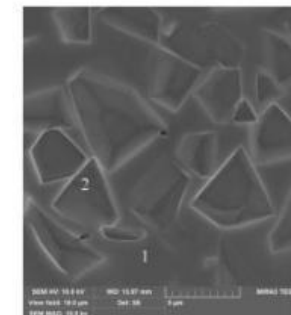
SEM зразків кордієритової кераміки складу C-1



a



b



c

1 - склофаза; 2 - кордієрит; 3 - пора;

а - 1250°C, б - 1300°C, с - 1350°C;

SEM зразків кордієритової кераміки складу C-3

					4ТС53.026.161.001.ДП.ПЗ								
Вим.	Аркуш	Прізвище	Підпис	Дата									
Розроб.		Палько Д.Г.			Розробка складів та дослідження властивостей радіопрозорої кордієритової кераміки				Літ.		Арк.	Аркушів	
Перевір		Калішенко Ю.Р									79	80	
									ННІ УДУНТ УДХТУ, каф ХТКС та БМ, гр 4-ТС-53				
Н. Контр.		Калішенко Ю.Р											
Зав.каф.		Зайчук О.В.											



Міністерство освіти і науки України
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»
Український державний університет науки і технологій
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

СЕРТИФІКАТ УЧАСНИКА

підтверджує, що

Дмитро ПАЛЬКО

взяв(ла) участь в роботі
XII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції
здобувачів вищої освіти та молодих учених
«ХІМІЯ І СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

Загальна кількість академічних годин: 12 год. (0,4 кредита ECTS)

член-кореспондент НАНУ
д.т.н., професор,
ректор УДУНТ

д.х.н., професор,
директор ННІ УДХТУ



Костянтин СУХИЙ

Ольга СВЕРДЛІКОВСЬКА



м. Дніпро
20-22 травня 2026