

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 666.3.019:621.365.5

Застосування енергії мікрохвильового поля у процесах спікання технічної кераміки**О. П. Угольніков¹, Н. О. Біленко^{2✉}, Д. М. Тортіка³, С. О. Борець⁴, С. Г. Комендант⁵**¹Військова академія (м. Одеса), вул. Фонтанська дорога, 10, Одеса, 65009, Україна;²⁻⁵Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: 2bilenko.onaft@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0003-3007-9285>; ²<https://orcid.org/0000-0002-6164-7954>; ³<https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>; ⁴<http://orcid.org/0009-0001-9899-1003>; ⁵<http://orcid.org/0009-0006-7554-9577>

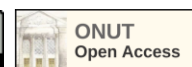
Визначені переваги та проблеми мікрохвильової обробки діелектричних матеріалів для виготовлення технічної кераміки, а також розглянуті методи вирішення негативних явищ, що можуть виникнути в процесі спікання кераміки в мікрохвильовому полі. Доведені унікальні особливості мікрохвильового спікання, серед яких швидке нагрівання матеріалу та скорочення часу з можливістю економії енергії до 90%; отримання набагато тонших та однорідних мікроструктур, що призводить до набагато кращих механічних властивостей; отримання нових матеріалів, які зазвичай неможливі за допомогою традиційних методів. Проведений аналіз взаємодії матеріалу з електромагнітним випромінюванням в мікрохвильовому діапазоні в залежності від діелектричних властивостей матеріалів, зокрема комплексної діелектричної проникності. Наголошується, що на даний час мікрохвильова технологія використовується для виробництва передової технічної кераміки, такої як мікрохвильові діелектричні компоненти (фільтри, резонатори, антени), вироби на основі карбиду вольфраму, кераміка надвисокої температури та реакційно-зв'язані композити. Наведені результати експериментальних досліджень процесу нагрівання в мікрохвильовому полі пресованого порошкового карбиду кремнію та оксиду алюмінію зі полівініловим спиртом та лігносульфонатом ЛСТ як сполученими. Проведений аналіз нерівномірності нагрівання зразків за товщиною. Визначено значення теплового ККД мікрохвильової камери та темп нагрівання пластини з пресованого порошку карбиду кремнію масою 0,165 кг при вихідній потужності магнетрону 800 Вт. Наведені результати апробації аналітичної залежності для розрахунку локальної температури діелектричного матеріалу в умовах дії мікрохвильового поля як внутрішніх джерел енергії. Представлені результати аналізу кривих температур при нагріванні діоксиду алюмінію із застосуванням сполучного 10% ЛСТ у мікрохвильовій камері та визначений темп нагрівання. Наголошується, що зростання темпу нагрівання після 150 оС обумовлено продуктами терморозпаду сполученого.

Ключові слова: Мікрохвильове нагрівання; Діелектричні властивості; Ефективність; Темп нагріву; Експериментальні дослідження; Нерівномірність; Порошки карбиду кремнію та оксиду алюмінію

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3495>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**1. Вступ**

Протягом останнього десятиліття було проведено багато досліджень та експериментів з мікро-

хвильового нагрівання та обробки кераміки та композитних матеріалів. Значна частина цих зусиль була стимульована унікальними та потенційними перевагами, які мікрохвильова енергія може

забезпечити порівняно з традиційними методами обробки. Хоча мікрохвильова обробка кераміки все ще перебуває на ранній стадії розвитку, існує багато областей, які ще потребують вивчення, викликів, які потрібно вирішити, та економічних та комерційних переваг, які потрібно обґрунтувати. Хоча багато потенційних переваг використання мікрохвиль для обробки кераміки були визнані вже понад 30 років, лише протягом останніх 5-8 років універсальність та повний потенціал цього процесу набули широкої уваги. Зростаюча знаність про переваги обробки за допомогою мікрохвильової енергії очевидна з швидкого зростання кількості та обсягу доповідей, представлених на технічних зустрічах та симпозиумах, присвячених мікрохвильовій обробці. Взаємодія та поглинання (зчеплення) багатьох керамічних матеріалів, таких як оксиди, карбіди, бориди, нітриди та комбінації цих матеріалів (тобто композити з керамічною матрицею та багатофазні системи), викликали значний інтерес та уможливили абсолютно нові, і часто унікальні, способи обробки цих матеріалів. Вибіркові характеристики нагрівання при мікрохвильовій обробці роблять можливим локалізований нагрів та з'єднання керамічних матеріалів (оксидів, не оксидів, та комбінацій матеріалів), де потужність мікрохвильового випромінювання може бути

зосереджена, головним чином, в областях, що з'єднуються. Ця унікальна особливість відкриває широкий спектр можливостей для керамічного з'єднання, які неможливо здійснити звичайними засобами. Однак, для отримання детального розуміння природи та розподілу електромагнітного поля всередині мікрохвильового резонатора, взаємодії мікрохвиль з матеріалом, перетворень матеріалів та механізмів теплопередачі для оптимізації процесу, необхідно провести додаткові дослідження.

2. Аналітичний огляд наукових праць за темою досліджень спікання кераміки в мікрохвильовому полі

2.1. Аналіз переваг та недоліків мікрохвильового методу спікання матеріалів для технічної кераміки

Через природу швидкого нагрівання мікрохвилями процес з'єднання частинок матеріалу в процесі спікання може бути у багато разів швидшим, ніж за допомогою звичайних методів [1]. Переваги використання мікрохвильової енергії перераховані в таблиці I, також зазначені деякі типові проблеми, що виникають при мікрохвильовому нагріванні матеріалів для виготовлення керамічних виробів.

Таблиця 1 – Переваги та проблеми мікрохвильової обробки діелектричних матеріалів для виготовлення технічної кераміки [1]

ПЕРЕВАГИ	ПРОБЛЕМИ, ЯКІ ВИНИКЛИ
Економія коштів (години та енергії)	Неможливість нагрівання низькодіелектричної кераміки
Швидкий внутрішній нагрів	Тепловий розгін
Точний та контрольований нагрів	Розтріскування зразка
Вибірковий нагрів	Дугове горіння та плазма
Покращена якість та властивості	Неоднорідний нагрів (низька теплопровідність зразка)
Синтез нових матеріалів	Погана передача МХ енергії до матеріалу
Можливості обробки неможливі традиційними методами	Реакція з теплоізоляцією

Перші п'ять проблем, наведені у таблиці 1, можуть мати загальні причини, так що вирішення однієї з них, ймовірно, буде вирішенням кількох або всіх цих проблем. Наприклад, такі матеріали, як високочистий Al_2O_3 або ZrO_2 , що мають дуже низькі коефіцієнти діелектричних втрат і низьку теплопровідність при кімнатній температурі, важко нагрівати спочатку за допомогою мікрохвильового випромінювання, ці матеріали схильні до локального нагрівання (гарячі точки та тепловий розгін) та розтріскування. Коротко шляхи вирі-

шення проблем, перелічених у табл. 1, наведені у табл. 2.

Спікання зразків з природної алюмосилікатної сировини в мікрохвильовому полі дозволяє отримати високу міцність матеріалу за коротку годину порівняно з конвективним нагріванням [10]; технологія спікання матеріалу в полі мікрохвильової печі залежить від мінеральної структури сировини, з якої він виготовлений. Доведено, що можливо отримати зразки без дефектів під час випалювання в мікрохвильовому полі, якщо в суміш із при-

Таблиця 2 – Проблеми та прогрес в обробці кераміки в мікрохвильовій камері

ПРОБЛЕМИ, ЯКІ ВИНИКЛИ	РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ
Неможливість нагрівання низькодіелектричної кераміки	- Ефективне з'єднання з мікрохвильовою/водною обробкою (тобто одномодова обробка з ефективним узгодженням та налаштуванням) - Інновації в багатомодовій обробці: гібридний мікрохвильовий нагрів - Використання поглинаючих мікрохвильових/водних добавок [2]
Тепловий розгін	- контроль температурно-залежних діелектричних властивостей матеріалу. - Оптимізація електричного поля та використання активного управління потужністю. - використання систем керування зі зворотним зв'язком [3]
Розтріскування зразка	- Зменшення температурних градієнтів - Контроль фазових змін [4]
Дугове горіння та плазма	- Більш ефективне зчеплення - Запобігання розтріскуванню - Покриття термопарі ізоляцією - Введення газоподібного азоту (N ₂) [5]
Неоднорідний нагрів (низька теплопровідність зразка)	- Покращене виділення енергії та управління теплом - Зменшення втрат енергії за допомогою теплоізоляції - Пристрій модифікації поля, багатоходові камери - Дуже однорідний розмір та структура зерен [6]
Погана передача МХ енергії до матеріалу	- регулювання товщини матеріалу та використання відповідних частот. - використання фокусуючої оптики (наприклад, лінз або частотно-селективних поверхонь). - Оптимізація кутів падіння та використання узгодження імпедансу для зменшення відбиттів [7]
Реакція з теплоізоляцією	- використання матеріалів з дуже низькими коефіцієнтами діелектричних втрат (наприклад, високочистий оксид алюмінію, кварц або деревоволокниста плита). - Переконалися, що ізоляція інертна до матеріалу за високих температур. - використання інертної атмосфери (азот) для запобігання регідратації або окислення. - Оптимізація товщин ізоляції для рівномірного нагрівання [8], [9]

родної алюмосилікатної сировини ввести легкоплавкий мінералізатор (у даному випадку сіль NaCl). Використання мікрохвильового процесу для спікання та синтезу пропонує такі унікальні особливості [11]:

- Швидке нагрівання матеріалу та скорочення часу обробки роблять споживання енергії нижчим, ніж за допомогою традиційних методів. Можлива економія енергії до 90%.

- Покращення спікання та кінетики реакції забезпечують набагато тонші та однорідні мікроструктури у спеченому продукті, що призводить до набагато кращих механічних властивостей.

- Взаємодія мікрохвиль з речовиною та анізотермічні умови часто призводять до кращої якості та отримання нових матеріалів, які зазвичай немож-

ливі за допомогою традиційних методів.

У Японії [11] повідомили про успішне спікання великих комерційних виробів із глинозему для підкладок, високотемпературної оптики та конструкційних застосувань. Кільце з глинозему діаметром 15 дюймів було спечене до повної густини за допомогою мікрохвильового процесу лише за 20% від загальної години циклу і лише за одну десяту від спожитої енергії при використанні звичайного процесу. Крім того, міцність на вигін була покращена майже на 30%, а усадка була приблизно на 60% меншою, ніж у виробленого традиційним способом продукту.

2.2. Особливості взаємодії матеріалу з електромагнітним випромінюванням

Взаємодія матеріалу з електромагнітним випромінюванням в мікрохвильовому діапазоні залежить від його діелектричних властивостей, зокрема комплексної діелектричної проникності. Нагрівання матеріалу, яке часто називають діелектричним нагріванням або нагріванням за рахунок діелектричних втрат, безпосередньо пов'язане з уявною частиною цієї діелектричної проникності, коефіцієнтом діелектричних втрат (ϵ''). Коефіцієнт втрат ϵ'' визначає здатність матеріалу поглинати мікрохвильову енергію та перетворювати її на тепло. Для значного внутрішнього нагрівання молекули в матеріалі повинні бути полярними (наприклад, вода або багато оксидів), матеріал матиме структурні дефекти або є достатньо провідним на заданій частоті [12].

Матеріали зазвичай класифікуються за їхньою поведінкою.

I. Матеріали з низькими втратами (або прозорі): неполярні або непровідні матеріали (наприклад, деякі полімери або оксиди за низьких температур), які дозволяють мікрохвилям проходити з мінімальним поглинанням та нагріванням.

II. Поглинаючі матеріали (або сусцептори): матеріали, які сильно поглинають мікрохвилі та швидко нагріваються (мають високий ϵ'').

III. Відбиваючі матеріали: матеріали (переважно метали та електричні проводники), які відбивають більшу частину падаючої енергії.

Важливо зазначити, що всі матеріали демонструють певну ступінь відбиття мікрохвиль на своїй поверхні або межі розділу, а ступінь проникнення пов'язаний з глибиною проникнення та імпедансом матеріалу. Поглинаючий матеріал, який використовується для початку процесу нагрівання, називається сусцептором.

Досягнення високотемпературних умов для спікання матеріалів за допомогою прямого мікрохвильового нагріву створює кілька проблем. Звичайні мікрохвильові аплікатори, які часто працюють на низьких частотах (зазвичай 2,45 ГГц), часто мають труднощі з ефективним з'єднанням з багатьма керамічними матеріалами за кімнатної температури. Це пояснюється тим, що діелектричні втрати (ϵ'') більшості кераміки дуже низькі у холодному стані; вони значно зростають лише вище певної критичної температури (часто 400-600 °C). Це дуже ускладнює початковий нагрів. Крім того, кераміка, з її неоднорідними властивостями (такими як діелектрична проникність та втрати), ускладнює цю взаємодію. Для великих керамічних ви-

робів нерівномірне нагрівання може призвести до сильних теплових градієнтів, що спричиняє розтріскування та руйнування. Швидке нагрівання може спричинити термічні напруження, небажану пористість та утворення локальних гарячих точок, що може призвести до надвисокого теплового витоку [13-15].

Щоб подолати ці проблеми, були розроблені методи гібридного нагрівання. Ці методи поєднують пряме мікрохвильове нагрівання з вторинним джерелом тепла, часто це матеріал тосцептора з високими діелектричними втратами (ϵ'') за низьких температур.

Тосцептор поглинає мікрохвильову енергію з самого початку та швидко досягає високих температур, передаючи тепло керамічному зразку за допомогою звичайних механізмів, таких як випромінювання. Як тільки зразок досягає критичної температури, його власні діелектричні втрати збільшуються достатньо, щоб він міг ефективно поглинати мікрохвилі та нагріватися всередині. Цей гібридний підхід пропонує підвійний механізм нагрівання: тосцептор нагріває матеріал від поверхні, а мікрохвилі нагрівають його від центру. Це призводить до більш рівномірного нагрівання порівняно з прямим мікрохвильовим нагріванням, де центр зазвичай стає гарячішим за поверхню (тепловий розгін). Зменшення тепловитрат від поверхні, завдяки тосцептору, додатково сприяє підтримці теплової однорідності під час процесу [16-19]. На практиці це передбачає розміщення різних видів струмоприймачів (трубок, пластин, стрижнів тощо) поблизу нагрівальної деталі [19]. Досі існують труднощі з точним вимірюванням температури спікання, оскільки термометри та пірометри мають обмеження. Проте аналіз кінцевого стану кераміки, глазури та зовнішнього вигляду може бути корисним інструментом для оцінки та картування температури випалу готових виробів [20].

У роботі [21] продемонстровано, що можливо побудувати та використовувати керовану та налаштовану мікрохвильову піч з регульованою температурою, високою швидкістю нагріву для випалу традиційної ремісничої чи художньої кераміки. Показано, що це можна зробити, використовуючи матеріали та обладнання, доступні в звичайних роздрібних магазинах. Також підкреслено велику гнучкість мікрохвильового нагрівання для ремісничого керамічного виробництва, навіть у неідеально налаштованій печі.

На рис. 1 наведено фото мікрохвильової пічі

для спікання токоприймачів та процедур випалу, яка містила високотемпературну комірку, що дозволяла уникнути перегрівання магнетрону завдяки своїм теплоізоляційним властивостям. Проте уникнути виникнення гарячих точок не вдалося.

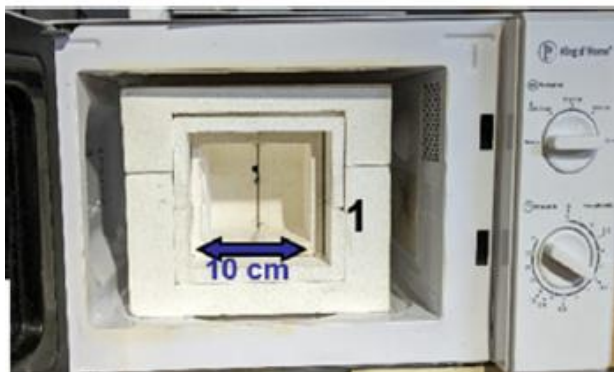


Рисунок 1 – Модифікована мікрохвильова піч об'ємом 18 літрів: 1 – ізольована високотемпературна комірка об'ємом 0,8 л

Визначено [21], що добавка Fe_3O_4 дозволяє реактивне спікання SiC за низької температури (850-950 °C) та низького тиску (1 бар) з утворенням силікатної зв'язувальної речовини, що є дуже перспективним напрямком для розробки нових низькоенергетичних процесів виробництва матеріалів на основі SiC.

Під час розгляду економічних переваг основна увага приділялася безпосередньому зв'язку енергії з керамічною деталлю або порошком та різній ефективності процесу, що виникає внаслідок цього явища [22]. Нагрівання самої деталі визначається її масою, питомою теплоємністю та бажаною зміною температури. Для нагрівання деталі від однієї температури до іншої потрібна однакова кількість енергії, незалежно від того, чи використовується газ, електрика, інфрачервоне чи електромагнітне випромінювання. Реальна перевага мікрохвильової обробки менше пов'язана з прямою зв'язкою мікрохвильової енергії з деталлю, а більше з гнучкістю, що надається розробнику обладнання. Ключовим питанням при мікрохвильовій обробці кераміки є не то, чи чутливий матеріал до мікрохвильової енергії, а то, як контролювати це явище, коли воно виникає. Багато матеріалів чутливі до мікрохвильової енергії, але для прояву такої поведінки необхідно досягти різних температур. Наприклад, діоксид цирконію не чутливий до мікрохвильової енергії за кімнатної температури. Однак, залежно від умов процесу, він почне сприймати мікрохвильову енергію при температурі між 600-1200 °C.

Завдання розробника системи полягає у створенні контрольованого середовища, за допомогою якої керамічні матеріали можна довести до достатньої температури за допомогою відомого струмоприймача. Після досягнення цієї температури кераміка починає отримувати мікрохвильову енергію та самостійно нагріватися. Ця технологія пропонує новий підхід до проектування печі, що дозволяє стратегічно розмістити джерело випромінюючого тепла в найбільш бажаному місці. Додатковою перевагою є ступінь, до якої деталь, що піддається термічній обробці, сприйнятлива до мікрохвильової енергії. Поєднання цих двох факторів (конструкція печі та сприйнятливість порошку/деталі) покращує термічну обробку, що, у свою чергу, покращує вихід продукції та властивості матеріалу.

Кераміка на основі дібориду цирконію (ZrB_2) застосовується у вогнетривкій та ливарній промисловості завдяки високій температурі плавлення, проте ущільнення ZrB_2 є складним через ковалентний зв'язок та поверхневі домішки, але додавання карбіду кремнію (SiC) не тільки збільшує утілення, но також призводить до нових якостей. У поєднанні з SiC, кераміка ZrB_2 знаходить широке застосування в балістичній броні, ріжучих інструментах, ракетних двигунах та передніх кромках космічних апаратів, що повертаються в атмосферу, а мікрохвильове спікання сприяє ущільненню за нижчих температур порівняно зі звичайним спіканням [23]. Мікрохвильова технологія використовується для виробництва передової технічної кераміки, такої як мікрохвильові діелектричні компоненти (фільтри, резонатори, антени), виробу на основі карбіду вольфраму, кераміка надвисокої температури (УНТ) та реакційно-зв'язані композити, такі як B4C-SiC. MX технологія використовується при виготовленні сегнетоелектриків [24], кераміки з покращеними п'єзоелектричними властивостями [25].

Керамічний порошок $Y_2O_3-ZrO_2$ став життєво важливим структурним та функціональним матеріалом у керамічних застосуваннях завдяки своїм чудовим характеристикам, включаючи зносостійкість, термостійкість та корозійну стійкість. Мікрохвильове сушіння дозволяє досягти агломерації та покращення якості порошку діоксиду цирконію, що є вирішальним для зниження промислових витрат [26]. Мікрохвильова діелектрична кераміка знаходить широку сферу застосування в комунікаційних технологіях [27, 28].

Протягом останніх десятиліть відбулися значні

досягнення у галузі мікрохвильової обробки матеріалів. Оскільки мікрохвильова обробка є відносно новою технологією, для впровадження цієї технології в керамічній промисловості може знадобитися значна година.

Метою роботи є визначення умов ефективного використання енергії мікрохвильового поля в процесі нагрівання порошкових діелектричних матеріалів для технічної кераміки. Для досягнення даної мети сформульовані наступні задачі:

- Провести експериментальні дослідження процесу нагрівання в мікрохвильовому полі матеріалів, що необхідні для виготовлення технічної кераміки, зокрема порошкового карбиду кремнію та оксиду алюмінію.

- Визначити вплив полівінілового спирту та лігносульфонату як сполучених на нагрівання зразків в мікрохвильовому полі.

- Провести аналіз нерівномірності нагрівання зразків за товщиною та розглянути методи підвищення рівномірності розподілу температури

- Провести оцінку теплового ККД мікрохвильової камери та темпу нагрівання матеріалів для виготовлення технічної кераміки.

3. Експериментальна мікрохвильова установка

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, принципова схема якої представлена на рис. 2.

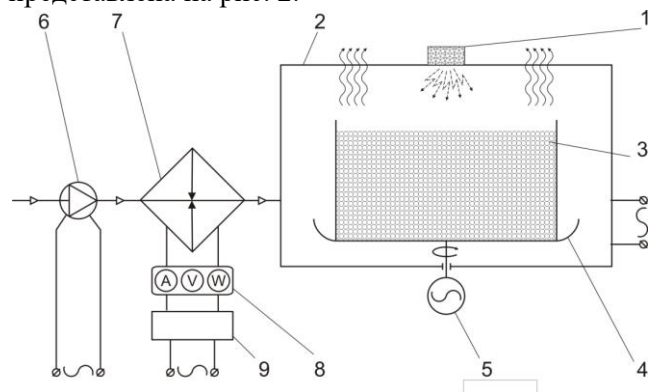


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки для дослідження процесів нагрівання діелектричних матеріалів у мікрохвильовому полі: 1 – хвилевід; 2 – робоча камера; 3 - експериментальна комірка; 4 – підставка; 5 – механізм приводу; 6 – вентилятор; 7- нагрівач, 8 – лабораторний автотрансформатор RUCELF ЛАТР LTC-3000; 9 – джерело живлення

Для рівномірного нагрівання матеріал поміща-

ють на підставку, що обертається. У робочу камеру прямокутного перерізу розмірами 306x201x322 мм надходить енергія через хвилевід від магнетрону з частотою 2,45 ГГц та регульованою потужністю 90-800 Вт. При одночасному мікрохвильовому та конвективному підведенні теплоти повітря по повітроводу нагнітається в камеру 2 вентилятором 6, нагрівач 7 з вимірювальним комплектом 8 і регулятором напруги 9 дозволяти отримувати повітря з різною температурою, яка змінювалася в межах 20...40 °С. В експериментальну комірку поміщався досліджуваний матеріал, який оброблявся в мікрохвильовій камері.

Досліджувалися зразки у вигляді спресованих платівок зі сполучною. З порошків пресують пластинки розміром 2,5x6 см, товщиною 1,0 см. Як сполучний (пластифікатор) застосовувався насичений водний розчин ПВС і лігносульфонат. Полівініловий спирт (ПВС, міжнародне PVON, PVC або PVAL) – це штучний, водорозчинний, термопластичний полімер. На рис. 3 наведено фото сухого ПВС та його водного розчину.



Рисунок 3 – Полівініловий спирт у різних станах: а) – ПВС у сухому вигляді; б) – водний розчин ПВС

Лігносульфонати (технічні) являють собою природні водорозчинні сульфопохідні лігніну. Це суміш різних солей (в основному натрієвих) лігносульфонових кислот з рясною домішкою редуруючих та мінеральних речовин.

На рис. 4 представлені фото ПВС і ЛСТ, які застосовувалися як сполучні під час проведення експериментів.

Кількість сполучного становило 1%, 5%, 10% (з розрахунку на суху вагу). Після пресування визначають геометричну густину зразків за такою методикою: пластинки шліфують та вимірюють їх лінійні розміри з точністю 0,1 мм та масу з точністю 0.001 г. Густина розраховують за формулою:

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot h}, \quad (1)$$

де m – вага пластинки; a, b, h – геометричні розміри-

ри пластини; ρ – густина речовини.

Для досягнення високої кінцевої густини спечених зразків необхідно, щоб відносна густина «сирих» зразків становила не менше 55% густини ідеального монокристалу.



Рисунок 4 – Сполучні для експериментального дослідження нагрівання порошків як основи отримання технічної кераміки: а) – полівініловий спирт; б) – лігносульфонат технічний

4. Результати проведення експериментів та їх аналіз

Досліджувався темп нагрівання пластинки з пресованого порошкового карбіду кремнію завтовшки $\delta = 1,0$ см, Дисперсність (фракція) частинок 125 мкм. Сполучною речовиною служив полівініловий спирт. Маса зразка становила 0,165 кг, вихідна потужність магнетрону $P = 800$ Вт. Температурна крива нагрівання пластинки з порошку карбіду кремнію в мікрохвильовому полі (рис. 5) показує, наскільки інтенсивно перетворюється МХ енергія на теплову. Вимірювання проводилися на поверхні зразка (лінія 1) та на його дні (лінія 2). Видно, що дно зразка, ізольоване від навколиш-

нього середовища при нагріванні, нагрівається інтенсивніше. Також було відмічено, що, починаючи з якогось температурного рівня (для даного зразка – при температурі близько 220 °С), темп нагрівання посилювався, що можна пояснити збільшенням значення діелектричної проникності карбіду кремнію. На рис. 5 цей рівень відзначений пунктирною лінією.

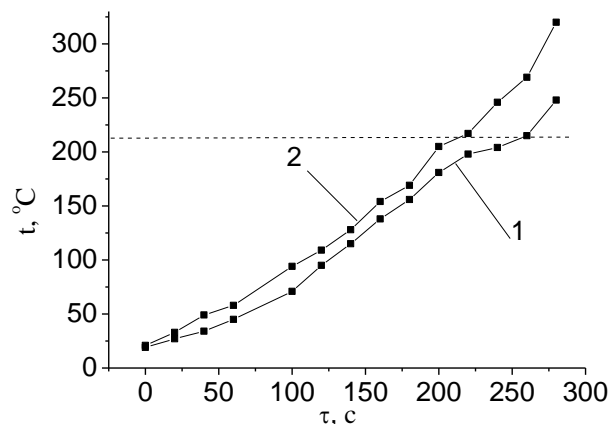


Рисунок 5 – Нагрів пластинки з порошку карбіду кремнію в МХ полі. Вихідна потужність магнетрону $P = 800$ Вт: 1 – поверхня; 2 – основа

Фізичні властивості карбіду кремнію відповідали та наведені в табл. 3. Розрахунок темпу нагрівання та тепловий ККД камери представлений у табл. 4. Для розрахунку ККД камери використовувалися дані по температурі, отримані в основі пластини.

Значення ККД камери показують, що енергія мікрохвильового випромінювання лише частково перетворюється на внутрішню енергію матеріалу, що пов'язано з малим завантаженням камери.

Таблиця 3 – Фізичні властивості порошку карбіду кремнію

Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	Густина ρ , кг/м ³	Теплоємність c_p , Дж/(кг·К)	Довжина хвилі МХ, λ_0 , м	Фактор втрат ϵ''	Глибина проникнення Δ , м
12	2500	600	0,122	0,9	0,0096

Таблиця 4 – Розрахункові характеристики нагріву порошку карбіду кремнію масою 0,165 кг в мікрохвильовому полі потужністю $P = 800$ Вт

№	τ , с	$t_{\text{пов}}$, °С	$(\Delta t/\tau)_{\text{пов}}$, К/с	$t_{\text{осн}}$, °С	$(\Delta t/\tau)$, К/с	ККД камери, %
1	0	20	-	20	-	-
2	20	27,3	0,4	33,2	0,7	11,1
3	40	34,2	0,35	49,1	0,8	7,8
4	60	45,6	0,55	58,3	0,45	4,6
5	80	58,5	0,65	72,2	0,7	6,9
5	100	71,2	0,65	94,4	1,1	11
6	120	95,1	1,2	109,1	0,75	7,3
7	140	115,3	1,0	128,5	0,95	9,4

Продовження таблиці 4

8	160	138,2	1,25	154,7	1,3	13
9	180	156,6	0,9	169,4	0,75	7,3
10	200	181,4	1,25	205,3	1,95	17,7
11	220	198,8	0,85	217,2	0,6	5,9
12	240	204,3	0,3	246,3	1,45	14,4
13	260	215,7	0,55	269,4	1,15	11,6
14	280	248,5	1,65	320,3	2,55	25,2

Для розрахунку температури матеріалу в умовах дії мікрохвильового поля без урахування зміни вологовмісту апробована залежність [29]:

$$t(x, \tau) = (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}) t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_{\text{нос}} - \frac{n_0}{c\rho a\alpha^2} \left[e^{-\alpha x} - \frac{1}{2} e^{\alpha^2 a\tau - \alpha x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \alpha\sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\alpha^2 a\tau + \alpha x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \alpha\sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] \quad (2)$$

де n_0 – максимальна питома потужність джерела, Вт/м³; α – коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії у шарі матеріалу, 1/м; a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/с; c – теплоємність матеріалу, Дж/(кгК), x – поточна координата, м.

Розрахунок температури проводився на поверхні пластини та результати зіставлялися з експериментальними, результати наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Результати розрахунку температури поверхні зразка SiC+ПВС та похибка розрахунку ε

№	τ , с	t , °С	$t(x, \tau)$, °С	ε , %
1	0	20	20	-
2	20	27,3	30,3	11
3	40	35,2	41,7	18,5
4	60	45,6	52	14
5	80	58,5	65,4	12
6	100	71,2	82,8	16,3
7	120	95,1	102,1	7,4
8	140	115,3	121,9	5,7
9	160	138,2	146,5	6,0
10	180	156,6	163	4,1
11	200	181,4	185	2,0
12	220	198,8	208	4,6
13	240	204,3	225,3	10,3
14	260	215,7	250	15,9
15	280	248,5	284,4	14,4

Аналіз табл. 5 показує, що розрахункові значення завжди перевищують експериментальні. Це зв'язано з тим, що при отриманні залежності (2)

приймалися граничні умови I роду. Максимальна похибка визначення температури за розрахунковою залежністю досягає 18,5 %, причому у середньому різницю між експериментом і розрахунком становили 11 %. Це дозволяє рекомендувати залежність (2) при моделюванні процесів нагріву в мікрохвильовому полі зразків для технічної кераміки.

Досліджено нагрівання композиційного порошку на основі порошку оксиду алюмінію. Проблема отримання зносостійких керамік за традиційними технологіями пов'язана з тим, що особливістю даних технологій є відносно повільне нагрівання, що призводить до тривалого циклу спікання. Досліджувався вплив добавки порошку карбіду кремнію на температуру нагрівання порошку оксиду алюмінію у мікрохвильовому полі. Відомо, що до температури 1100 °С Al₂O₃ прозорий для мікрохвильового випромінювання, інтенсивне поглинання мікрохвильової енергії відбувається на рівні температури спікання – близько 1400 °С. На рис. 6 представлені результати нагрівання в мікрохвильовому полі композиційного порошку з наступним складом: Al₂O₃+5 об. % SiC-частинки. Як сполучний використовувався лігносульфонат (технічний, рідкий) 10 об. %. Початкова температура становила 50 °С, оскільки для якісного перемішування сполучного з порошком рідину слід підігріти для зменшення в'язкості.

Аналіз кривих показує, що темп нагрівання матеріалу з додаванням 10 % ЛСТ збільшується після температури вище 150 °С (криві 1, 2). Це з розкладанням лігносульфоната, унаслідок чого продукти терморозпаду, які починають утворюватися за температури вище 130 °С. Найбільш інтенсивно поглинають мікрохвильову енергію. Темп нагрівання сягав 2 К/с. Однак такий інтенсивний характер нагріву спостерігався для маси 20 г і 50 г і при додаванні сполучного суміш порошків. Без сполучного (крива 4) темп нагрівання становив 0,226 К/с. Таким чином, на інтенсифікацію нагріву впливає в першу чергу добавка сполучного ЛСТ, а потім – добавка кремнію карбіду. Слід зазначити, що

для обраних малих мас нагрівання відбувалося в умовах значної концентрації мікрохвильової енергії у зразку.

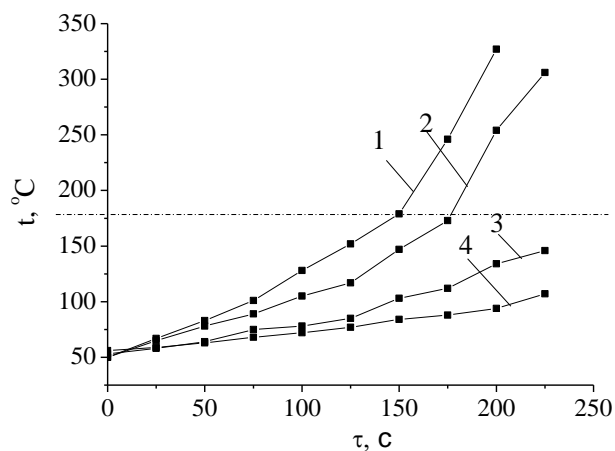


Рисунок 6 – Нагрів композиційного порошку на основі діоксиду алюмінію ($Al_2O_3 + 5$ об.% SiC) із застосуванням сполучного 10% ЛСТ у мікрохвильовій камері: 1 – маса зразка 20 г; 2 – маса зразка 50 г; 3 – маса зразка 70 г; 4 – маса зразка 20 г без сполучного. Вихідна потужність магнетрону 600 Вт.

Аналіз результатів нагрівання порошків, які використовують для виготовлення технічної кераміки, довів, що при мікрохвильовому нагріванні зразків нерівномірність температури дуже велика. Відхилення температури по товщині для відкритої пластини карбіду кремнію завтовшки 10 мм може досягати 27 %. Відхилення між центром і краєм (відстань 1,75 см) зразків масою до 50 г досягає 50%. Застосування як сполучного лігносульфонату при мікрохвильовій обробці порошків показує, що внаслідок його високих діелектричних властивостей нагрівання в мікрохвильовому полі проходить інтенсивно, причому починаючи з температури 320 °C темп нагрівання посилюється, що пов'язано зі збільшенням діелектричних характеристик продуктів терморозпаду. Збільшення рівномірності нагріву в мікрохвильовій камері може бути досягнуто за рахунок покриття внутрішньої поверхні форми або поверхні матеріалу речовиною, що ефективно поглинає мікрохвильове випромінювання, наприклад, сажею.

5. Висновки

При мікрохвильовому нагріванні зразків матеріалів для технічної кераміки спостерігається дуже велика нерівномірність температури. Відхилення

температури по товщині для відкритої пластини карбіду кремнію завтовшки 10 мм досягає 27%. Відхилення між центром і краєм (відстань 1,75 см) зразків досягає 50%.

Внаслідок високих значень фактору діелектричних втрат сполучного лігносульфонату, нагрівання в мікрохвильовому полі порошків $Al_2O_3 + 5$ об.% SiC із застосуванням 10% ЛСТ проходить інтенсивно, причому починаючи з температури 320 °C темп нагрівання посилюється, що пов'язано зі збільшенням діелектричних характеристик продуктів терморозпаду.

Значення теплового ККД камери показує, що при недовантаженні мікрохвильової камери енергія мікрохвильового випромінювання лише частково перетворюється у внутрішню енергію матеріалу. Максимальне значення ККД становило 25,2 %. Темп нагрівання порошку карбіду кремнію масою 0,165 кг при вихідній потужності магнетрону 800 Вт досягає 2,55 К/с.

Збільшення рівномірності нагріву в мікрохвильовій камері може бути досягнуто за рахунок покриття внутрішньої поверхні форми або поверхні матеріалу речовиною, що ефективно поглинає мікрохвильове випромінювання.

Апробація аналітичної залежності для розрахунку локальної температури діелектричного матеріалу в умовах дії мікрохвильового поля як внутрішніх джерел енергії довела можливість її застосування з максимальною похибкою $\varepsilon = 18,5$ % при зіставленні з експериментальними даними, отриманими на зразках SiC зі сполученим ПВС.

Особистий внесок авторів CRediT

Угольніков О.П.: методичне забезпечення, планування експерименту. **Біленко Н.О.:** створення методологічних засад роботи, експериментальні дослідження. **Тортіка Д.М.:** експериментальні дослідження, інформаційний пошук, аналіз даних. **Борець С.О.:** математична обробка результатів експериментів, проведення теплових розрахунків. **Комendanт С.Г.:** аналітичний огляд літературних даних, аналіз та обробка результатів експерименту.

Література

1. Sutton W. H. Microwave Processing of Ceramics - An Overview // MRS Proceedings. – 1992. – Vol. 269. DOI: <https://doi.org/10.1557/proc-269-3>.
2. A. Ikesue. Processing of Ceramics. – NY: Wiley,

2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119538806>
3. **Chaix J.-M.** Microwave Sintering of Ceramics. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2021. – Vol. 1. – P. 327-341. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818542-1.00004-7>
4. **Adigun Afolabi O., Akanni Olanrewaju O.** Processing and Applications of Composite Ceramic Materials for Emerging Technologies // *Advanced Ceramics Materials - Emerging Technologies*. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007296>.
5. **Binner J., Vaidhyanathan B., Carney T.** Microwave Hybrid Sintering of Nanostructured YSZ Ceramics // *Advances in Science and Technology*. – 2006. – Vol. 45. – P. 835-844. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ast.45.835>
6. **Li J.-m., Qiu T.** Microwave sintering of $\text{Ca}_{0.6}\text{La}_{0.2667}\text{TiO}_3$ microwave dielectric ceramics // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. – 2012. – Vol. 19, no. 3. – P. 245-251. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0546-x>
7. **C. Manière et al.** Microwave flash sintering of metal powders: From experimental evidence to multi-physics simulation // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.017>
8. **T. Garnault et al.** Is direct microwave heating well suited for sintering ceramics? // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, no. 12. – P. 16716-16729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.242>
9. **Aman B., Acharya S., Reeja-Jayan B.** Making the Case for Scaling up Microwave Sintering of Ceramics // *Advanced Engineering Materials*. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202302065>
10. **Zhenzhurist I. A.** Effect of Microwave Energy on Phase Transformations of Aluminosilicates and Properties of Related Materials // *Inorganic Materials*. – 2018. – Vol. 54, no. 9. – P. 873-877. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0020168518090182>
11. **D. Agrawal et al.** Microwave Energy Applied to Processing of High-Temperature Materials // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2004. – Vol. 87, no. 3. – P. 39-44.
12. **Borrell A., Salvador M. D.** Advanced Ceramic Materials Sintered by Microwave Technology // *Sintering Technology – Method and Application*. – 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78831>
13. **J.-M. Chaix et al.** A viewpoint on hot spots in microwave sintering and flash sintering // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202201742>
14. **J. Monteiro et al.** Simulating the electromagnetic field in microwave ovens // *Proceedings of 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Natal, Brazil*. – 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/imoc.2011.6169274>
15. **A. Bansal, A. K. Sharma.** 3D Electromagnetic field simulation of silicon carbide and graphite plate in microwave oven // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics*. – 2014. – Vol. 1, No. 1. – P. 8-12. DOI: <https://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0828/20150828052741398.pdf>
16. **S. Singh et al.** Microwave Processing of Materials and Applications in Manufacturing Industries: A Review // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2014. – Vol. 30, no. 1. – P. 1-29. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.952028>.
17. **Oghbaei M., Mirzaee O.** Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 494, no. 1-2. – P. 175-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.068>
18. **Aman B., Acharya S., Reeja-Jayan B.** Making the Case for Scaling up Microwave Sintering of Ceramics // *Advanced Engineering Materials*. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202302065>
19. **Bhattacharya M., Basak T.** A review on the susceptor assisted microwave processing of materials // *Energy*. – 2016. – Vol. 97. – P. 306-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.034>
20. **T. Santos et al.** Temperature Assessment Through Decal Color in Microwave-Fired Porcelain // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2025. – Vol. 9, no. 7. – P. 213. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp9070213>
21. **Goffé B.** Microwave Firing of Ceramics: Developing Homemade Susceptors and Their Practical Applications // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, no. 24. – P. 13053. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152413053>
22. **M Dunn.** Microwave Heating of Ceramics // *CI Advanced features*. – 2015. URL: <http://www.ceramicindustry.com/articles/95044-microwave-heating-of-ceramics>.
23. **Sharma A., Karunakar D. B.** Development and investigation of densification behavior of ZrB₂-SiC composites through microwave sintering // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6, no. 10. – P. 105072. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3aca>
24. **S. V. Egorov et al.** Rapid microwave sintering of functional electroceramic materials (CA-4:IL02) //

Ceramics International. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.203>

25. **C. Zhang et al.** Microwave sintering of CaBi₂Nb₂O₉ ceramics for improved piezoelectric response and electrical resistivity // Journal of the American Ceramic Society. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.19986>

26. **W. Cao et al.** Research on the drying kinetics for the microwave drying of Y₂O₃-ZrO₂ ceramic powder // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.183>

27. **Zhang P, Lin J, Jia Q, et al.** Research Progress and Prospect of Microwave Dielectric Ceramic Materials for 5G Communication // Advanced Cera-

mics. – 2024. – Vol. 45(1-2). – P. 44-58. DOI: <https://doi.org/10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2024.01.004>

28. **Xu X-Y, Wu H-T.** A Review on the Microwave Dielectric Ceramics Testing Technology and Related Systems // Advanced Ceramics. – 2025. – Vol. 46(3-4). – P. 247-285. DOI: <https://doi.org/10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2025.03.002>

29. **Башкова І. Л., Волгушева Н. В., Потапов М. Д.** Дослідження явищ теплопровідності при мікрохвильовому сушінні матеріалу // Холодильна техніка та технологія. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 205-210. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v55i4.1629>.

Отримана в редакції 13.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Application of microwave field energy in technical ceramic sintering processes

*Alexander Ugol'nikov*¹, *Nataliia Bilenko*^{2✉}, *Dmitry Tortika*³, *Stanislav Borets*⁴, *Serhii Komendant*⁵

¹Odesa Military Academy, 10 Fontanska Road, Odesa, 65009, Ukraine;

²⁻⁵Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: 2bilenko.onaft@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0003-3007-9285>; ²<https://orcid.org/0000-0002-6164-7954>; ³<https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>; ⁴<http://orcid.org/0009-0001-9899-1003>; ⁵<http://orcid.org/0009-0006-7554-9577>.

The advantages and challenges of microwave processing of dielectric materials for the manufacture of technical ceramics are identified, and methods for mitigating negative phenomena that may arise during ceramic sintering in a microwave field are considered. The unique features of microwave sintering are demonstrated, including rapid material heating and significant reduction in processing time with the possibility of energy savings of up to 90%; the formation of much finer and more homogeneous microstructures, resulting in markedly improved mechanical properties; and the production of new materials that are typically unattainable using conventional methods. An analysis of material interaction with electromagnetic radiation in the microwave range is carried out depending on the dielectric properties of the materials, in particular the complex dielectric permittivity. It is emphasized that microwave technology is currently used for the production of advanced technical ceramics, such as microwave dielectric components (filters, resonators, antennas), tungsten carbide-based products, ultra-high-temperature ceramics, and reaction-bonded composites. The results of experimental studies of the heating process in a microwave field of pressed powder silicon carbide and aluminum oxide with polyvinyl alcohol and lignosulfonate LST as binders are presented. An analysis of heating non-uniformity across the sample thickness is performed. The thermal efficiency of the microwave chamber and the heating rate of a pressed silicon carbide powder plate with a mass of 0.165 kg at a magnetron output power of 800 W are determined. The results of validation of an analytical relationship for calculating the local temperature of a dielectric material under the action of a microwave field as internal energy sources are presented. The results of the analysis of temperature curves during heating of aluminum oxide using a 10% LST binder in a microwave chamber are presented, and the heating rate is determined. It is emphasized that the increase in the heating rate after 150 °C is caused by the products of thermal decomposition of the binder.

Keywords: Microwave heating; Dielectric properties; Efficiency; Heating rate; Experimental studies; Non-uniformity; Silicon carbide and aluminum oxide powders.

References

1. **Sutton, W. H.** (1992). Microwave Processing of Ceramics - An Overview. *MRS Proceedings*, 269.
2. **Ikesue, A.** (2021). *Processing of Ceramics*. Wiley.
3. **Chaix, J.-M.** (2020). Microwave Sintering of Ceramics. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1, 327-341.
4. **Adigun Afolabi, O., & Akanni Olanrewaju, O.** (2024). Processing and Applications of Composite Ceramic Materials for Emerging Technologies. *Advanced Ceramics Materials - Emerging Technologies*
5. **Binner, J., Vaidhyanathan, B., & Carney, T.** (2006). Microwave Hybrid Sintering of Nanostructured YSZ Ceramics *Advances in Science and Technology*, 45, 835-844.
6. **Li, J.-m., & Qiu, T.** (2012). Microwave sintering of $\text{Ca}_{0.6}\text{La}_{0.2667}\text{TiO}_3$ microwave dielectric ceramics. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19(3), 245-251.
7. **Manière, C., Lee, G., Zahrah, T., Olevsky, E. A.** (2018). Microwave flash sintering of metal powders: From experimental evidence to multiphysics simulation. *Acta Materialia*, 147, 24-34.
8. **Garnault, T., Bouvard, D., Chaix, J.-M., Marinel, S., & Harnois, C.** (2021). Is direct microwave heating well suited for sintering ceramics? *Ceramics International*, 47(12), 16716-16729.
9. **Aman, B., Acharya, S., Reeja-Jayan, B.** (2024). Making the Case for Scaling up Microwave Sintering of Ceramics. *Advanced Engineering Materials*.
10. **Zhenzhurist, I. A.** (2018). Effect of Microwave Energy on Phase Transformations of Aluminosilicates and Properties of Related Materials. *Inorganic Materials*, 54(9), 873-877.
11. **Dinesh Agrawal, Jiping Cheng, Hu Peng, Larry Hurt** (2004). Microwave Energy Applied to Processing of High-Temperature Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 87(3), 39-44.
12. **Borrell, A., & Salvador, M. D.** (2018). Advanced Ceramic Materials Sintered by Microwave Technology. *Sintering Technology - Method and Application*.
13. **Chaix, J.-M., Bouchet, R., Bouvard, D., Fabre, T., Garnault, T., Harnois, C., Koutoati, K., Lachal, M., Marinel, S., & Steil, M. C.** (2023). A viewpoint on hot spots in microwave sintering and flash sintering. *Advanced Engineering Materials*.
14. **Monteiro, J., Costa, L. C., Valente, M. A., Santos, T., & Sousa, J.** (2011). Simulating the electromagnetic field in microwave ovens. *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*.
15. **Amit Bansall, Apurbba Kumar Sharma** (2014). 3D Electromagnetic field simulation of silicon carbide and graphite plate in microwave oven. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research_IJMERR*, 1(1), 8-12.
16. **Singh, S., Gupta, D., Jain, V., & Sharma, A. K.** (2014). Microwave Processing of Materials and Applications in Manufacturing Industries: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(1), 1-29.
17. **Oghbaei, M., & Mirzaee, O.** (2010). Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 494(1-2), 175-189.
18. **Aman, B., Acharya, S., & Reeja-Jayan, B.** (2024). Making the Case for Scaling up Microwave Sintering of Ceramics. *Advanced Engineering Materials*.
19. **Bhattacharya, M., & Basak, T.** (2016). A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. *Energy*, 97, 306-338.
20. **Santos, T., Hennetier, L., Costa, V. A. F., Costa, L. C.** (2025). Temperature Assessment Through Decal Color in Microwave-Fired Porcelain. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(7), 213.
21. **Goffé, B.** (2025). Microwave Firing of Ceramics: Developing Homemade Susceptors and Their Practical Applications. *Applied Sciences*, 15(24), 13053.
22. **Dunn, M.** (2015) Microwave Heating of Ceramics. *CI Advanced features*
23. **Sharma, A., Karunakar, D. B.** (2019). Development and investigation of densification behavior of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ composites through microwave sintering. *Materials Research Express*, 6(10), 105072.
24. **Egorov, S. V., Ereemeev, A. G., Kholoptsev, V. V., Plotnikov, I. V., Rybakov, K. I., Sorokin, A. A., Balabanov, S. S., & Rostokina, E. Y.** (2022). Rapid microwave sintering of functional electroceramic materials (CA-4:IL02). *Ceramics International*.
25. **Zhang, C., Yu, H., Sun, J., Wang, Z., Chen, G., Lan, Z., Wang, J., Xu, S., Zhou, Z., Hong, J., Li, H., & Yang, B.** (2024). Microwave sintering of $\text{CaBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ ceramics for improved piezoelectric response and electrical resistivity. *Journal of the American Ceramic Society*.
26. **Cao, W., Zhou, J., Ren, C., Omran, M., Gao, L., Tang, J., Zhang, F., & Chen, G.** (2023). Research on the drying kinetics for the microwave drying of $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic powder. *Journal of Materials Research and Technology*.
27. **Peng Zhang, Jian LIN, Qiang JIA, Xiao-Jun**

Yang, Hui Li (2024). Research Progress and Prospect of Microwave Dielectric Ceramic Materials for 5G Communication. *Advanced Ceramics*, 45(1-2): 44-58.

28. **Xu X-Y, Wu H-T.** (2025). A Review on the Microwave Dielectric Ceramics Testing Technology and Related Systems. *Advanced Ceramics*, 46(3-4): 247-285.

29. **Boshkova, I. L., Volgusheva, N. V., Potapov, M. D.** (2019). Study of thermal conductivity phenomena during microwave drying of materials *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(4), 205-210.

Received 13 February 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026