

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 666.3/7:621.365.5:620.97

Дослідження енергетичної ефективності нагрівання в мікрохвильовому полі сировини для технічної кераміки на основі оксиду алюмінію

Є. О. Кравченко

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: odessaevgeniy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>

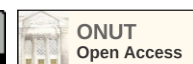
Доведена актуальність дослідження ефективності нагрівання в мікрохвильовому полі сировини для технічної кераміки на основі оксиду алюмінію (Al_2O_3), що пов'язано з високою енергоємністю керамічної промисловості та спонукає пошук енергоефективних технологій термічної обробки керамічних матеріалів. Визначено, що застосування мікрохвильового нагрівання здатне забезпечити об'ємне поглинання енергії матеріалом, високу швидкість нагрівання та можливість зниження температури і тривалості процесу. Об'єктом дослідження є порошкові композити на основі оксиду алюмінію зі зв'язуючим полівініловим спиртом. Експериментальні дослідження проводились у мікрохвильовій камері з частотою генерації 2,45 ГГц та змінною потужністю магнетрона. У процесі експериментів визначались температурні режими нагрівання, зміна маси зразків, темп нагрівання та коефіцієнт корисної дії мікрохвильової камери. Встановлено, що на початкових стадіях нагрівання ефективність процесу є відносно низькою через слабку взаємодію оксиду алюмінію з мікрохвильовим полем, однак зі зростанням температури діелектричні властивості матеріалу покращуються, що призводить до інтенсифікації нагрівання. Отримані результати показали, що ефективність перетворення мікрохвильової енергії в теплову суттєво залежить від маси завантаження та режимів обробки. Визначено, що існує оптимальна маса зразка, за якої коефіцієнт корисної дії мікрохвильової камери досягає максимального значення. Проведені теплові розрахунки дозволили оцінити об'ємну густину тепловиділення та визначити раціональні значення напруженості електричного поля, необхідні для ефективного нагрівання матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів мікрохвильового спікання керамічних матеріалів на основі оксиду алюмінію та масштабування процесів до промислового рівня. Дослідження спрямовані на підвищення енергетичної ефективності виробництва технічної кераміки та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: Діелектричні властивості; Коефіцієнт корисної дії; Магнетрон; Теплота; Швидкість нагрівання; Оптимальні параметри

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i2.3525>

© 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

Керамічна промисловість як енергоємна галузь має загальні викиди CO_2 в розмірі 19 мільйонів тонн щорічно в Європі, 83% з яких є наслідком спалювання палива та виробництва електроенергії під час спікання [1, 2]. В останні десятиліття низка

інноваційних технологій спікання, таких як рідкофазне спікання, спікання гарячим пресом, мікрохвильове спікання (МХ), іскрово-плазмове спікання та флеш-спікання, сприяли економії енергії в кераміці. Серед них мікрохвильовий метод привернув увагу завдяки своїм перевагам, таким як висока швидкість нагрівання, висока ефективність

та здатність покращувати властивості кінцевого продукту. Під час процесу мікрохвильового спікання зразки у вигляді порошків можуть бути ущільнені шляхом перетворення енергії, а не традиційної передачі тепла, оскільки поглинена мікрохвильова енергія перетворюється на теплову енергію внутрішніх дипольних молекул з відносно високими швидкостями. Визначено, що ряд керамік, включаючи хлориди, оксиди, фосфати та молібдати, добре спікаються за допомогою мікрохвильового поля, поєднання перехідної рідкої фази та мікрохвильового резонансу покращує рушійну силу спікання, механічні та діелектричні властивості обраних матеріалів покращуються на 50-95%, тоді як енергоспоживання різко знижується. Проте кожен тип технічної кераміки потребує індивідуального дослідження для виявлення оптимальних режимів виробництва. Вивчення енергоефективності спікання порошків оксиду алюмінію (Aluminum oxide) є принципово важливим не просто для економії енергії, а для розвитку всієї галузі технічної кераміки. Застосування виробів з оксиду алюмінію дуже широке: електронні компоненти та підкладки, високотемпературні електричні ізолятори, високовольні ізолятори, лазерні трубки, механічні компоненти, механічні ущільнення, прецизійні вали та осі в середовищах з високим зносом, коликові та кулькові підшип-

ники, ущільнювальні кільця та ін. Крім того, Al_2O_3 — «модельна система» в матеріалознавстві, яка добре досліджена та чутлива до параметрів процесу. Тому результати можна узагальнювати застосовувати до інших оксидних керамік.

Робота призначена дослідженню процесу нагрівання порошків оксиду алюмінію зі зв'язуючим полівініловим спиртом для виявлення енергетично ефективних режимів.

2. Аналітичний огляд проблеми спікання технічної кераміки на основі оксиду алюмінію

Керамічні підкладки на основі $\alpha-Al_2O_3$ широко використовуються в сучасній техніці та завдяки комплексу електрофізичних та техніко-економічних параметрів є найбільш затребуваними для виготовлення гібридних інтегральних схем (ГІС), силових напівпровідникових приладів (СПП) мікрохвильового діапазону [3]. Вони також широко використовуються як підкладки для епітаксialного вирощування тонких плівок, таких як вирощування напівпровідників III-V групи та оксидів. До прикладу, компанія Precision Ceramics пропонує три різновиди продукції з порошків оксиду алюмінію (рис. 1), які потребують різних методів виробництва, що призводить до дещо відмінних властивостей та характеристик [4].



Рисунок 1 – Керамічні вироби з Al_2O_3 (оксид алюмінію) [4]

Інтерес до спікання керамічних порошків в мікрохвильовому полі визначається можливістю забезпечення швидкого та низькоенергетичного процесу [5, 6, 7]. При цьому огляд літератури показує, що мікрохвильовий нагрів кераміки є більш успішним, коли нагрівання здійснюється за допомогою суспензії [8], де суспензія – це компонент, виготовлений з матеріалу, такого як карбід кремнію, який здатен інтенсивно поглинати мікрохвильову енергію та передає тепло до деталі, що спікається, головним чином за допомогою випромінювання. Ефективність використання суспензії в вигляді кільця продемонстровано в [9], автори отримали матеріали з механічними власти-

востями, порівнянними з тими, що отримані для традиційно спечених матеріалів, з загальним циклом нагрівання на 75% коротшим. Використання суспензії для методу допоміжного нагрівання був мотивований тим, що звичайна кераміка, така як оксид алюмінію та діоксид цирконію, не взаємодіє з мікрохвилями стабільно та ефективно. Крім того, взаємодія цієї кераміки з мікрохвилями може сильно змінюватися залежно від температури, що ускладнює керування мікрохвильовим нагріванням. Оксид алюмінію дуже слабо взаємодіє з мікрохвилями, особливо за кімнатної температури, він вважається «прозорим для мікрохвиль» [10], однак його здатність до взаємодії покращу-

ється зі збільшенням температури [11]. Діелектрична проникність ізоляційного матеріалу ϵ'' обирається значно нижча, ніж у зразка, ізоляційна комірка розсіювала більшу частину мікрохвильової енергії протягом усього випробування через значно більший об'єм. Однак її низька теплопровідність обмежувала здатність розсіювати генероване тепло. Це призвело на початку випробування до появи зони в ізоляційному матеріалі, де температура була вищою, ніж температура зразка. Ця локально висока температура в комірці сприяла її здатності до зв'язку та призводила до локалізованого теплового витіку. Цей витік може навіть призвести до температури вище точки плавлення ізоляції та спричинити її передчасну деградацію, як спостерігалось експериментально. Результати показують, що ізоляційна коробка не поведилася

як ідеально прозорий для мікрохвиль матеріал, хоча вона має набагато нижчий фактор втрат ϵ'' , ніж зразок, тобто оксид алюмінію. Необхідність застосування сильного електричного поля сприяла поглинанню мікрохвиль матеріалами з низьким ϵ'' , включаючи ізоляційний матеріал.

Щоб зменшити взаємодію ізоляційного матеріалу з полем, авторами [11] розглянуті різні геометрії комірок, яких відрізняли обмеження кількості ізоляційного матеріалу навколо зразка (рис. 2). Тим не менш, цей метод неминуче погіршує теплоізоляційну здатність системи, що сприяє появі теплових градієнтів та застосуванню вищої напруженості поля. Нагрівання за допомогою суцільного є найбільш релевантним методом для забезпечення ефективного та контрольованого спікання цих матеріалів.

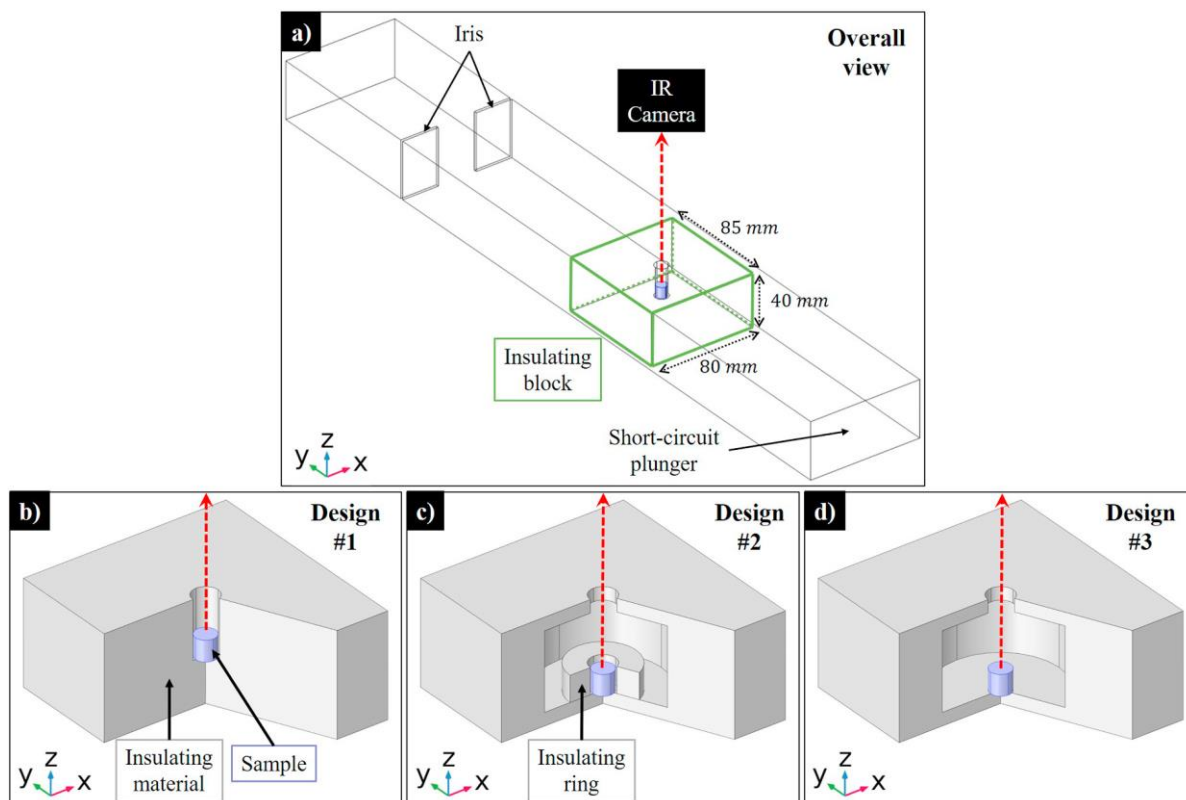


Рисунок 2 – Схеми конструкцій ізоляційних комірок: а) – огляд розташування ізоляційного блоку в резонаторі мікрохвильової печі та крупний план; b-d) – конструкції ізоляційних комірок [11]

Загальна потужність під час випробувань коливалася від 200 до 300 Вт, спостереження за ізоляційною коміркою після циклу нагрівання чітко показало тріщини. Можна знайти розплавлені ділянки всередині ізоляційної комірки, як показано на рис. 3. Отримано, що ізоляційний матеріал, навіть з дуже низькою мікрохвильовою здатністю зв'язку, може стати абсорбуючим середовищем, коли до нього прикладене достатньо сильне елек-

тричне поле [11].

Визначено, що при формуванні керамічних підкладок важливими науково-технічними проблемами стає розробка складу шліфувальної суміші з підбором компонентів, сумісних за ливарними властивостями, встановлення режимів приготування шліфувальної суміші, лиття, сушіння, видалення зв'язуючої речовини із заготовки-сирці та випалювання виробів [12].

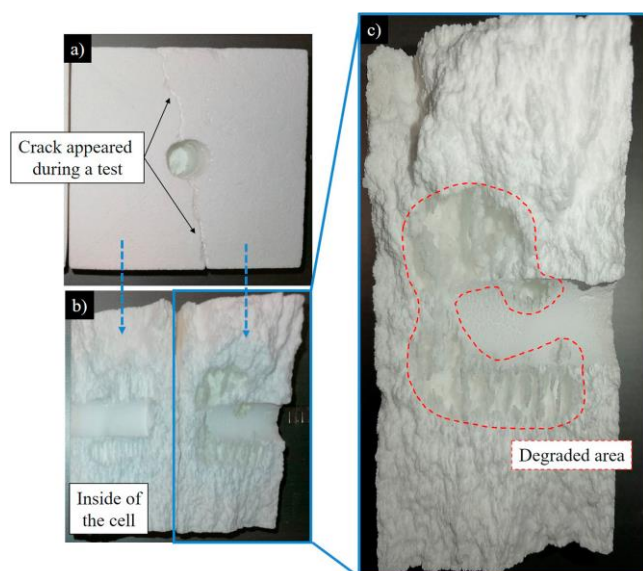


Рисунок 3 – Зображення ізоляційної комірки, пошкодженої під час мікрохвильового випробування: а) – вигляд комірки зверху, де спостерігалася тріщина; б) – вигляд комірки зсередини, через її отвір після тріщини; в) – збільшення одного з осьових перерізів комірки, що показує пошкоджену ділянку ізоляції [11]

Аналіз наукових праць дозволяє зробити висновки, що вивчення енергоефективності спікання порошків оксиду алюмінію (Al_2O_3) має критично важливе значення для сучасної технічної кераміки. Спікання є найбільш енергоємною стадією виробництва кераміки, яка зазвичай вимагає температур вище $1400\text{ }^\circ\text{C}$ та тривалого термічного впливу, що призводить до високого споживання енергії та пов'язаних з цим викидів CO_2 . Оскільки кераміка на основі оксиду алюмінію є одними з найбільш широко використовуваних матеріалів у таких сферах застосування, як електроніка, механічні компоненти та біомедичні пристрої, навіть незначні покращення енергоефективності можуть призвести до значних економічних та екологічних переваг. Більше того, оптимізація параметрів спікання, таких як температура, швидкість нагрівання та час витримки, не тільки зменшує споживання енергії, але й дозволяє точно контролювати мікроструктуру, включаючи розмір зерна, пористість та щільність, які безпосередньо визначають функціональні властивості кінцевого продукту. Досягнення в енергоефективних технологіях спікання, таких як іскрове плазмове спікання та мікрохвильова обробка, ще більше підкреслюють актуальність цієї галузі досліджень, пропонуючи скорочений час обробки та нижчі робочі температури. Таким чином, підвищення енергоефективності спікання оксиду алюмінію

є важливим завданням для підвищення стійкості, економічної ефективності та експлуатаційних характеристик технічної кераміки.

3. Матеріали та методи досліджень

Дослідження проводились в мікрохвильовій камері, в яку надходило мікрохвильове випромінювання від магнетрону з частотою генерації мікрохвильового поля $f = 2,45\text{ ГГц}$ з максимальною потужністю 1000 Вт . Матеріали для досліджень: порошок Al_2O_3 , сполучна – полівініловий спирт, який являє собою водорозчинний термопластичний полімер, гліцерин як пластифікатор, дистильована вода. При підготовці розчину до нагрітої води до $80\text{ }^\circ\text{C}$ поступово додають ПВС (5-10 мас. % розчин) і перемішують до повного розчинення, після чого охолоджують до кімнатної температури. Приймається таке відсоткове співвідношення компонентів: 60-75% Al_2O_3 (масова частка), 2-5% (від маси Al_2O_3) ПВС, 20-35 % – дистильована вода.

Методика досліджень складалась в наступному. Корундовий тигель зі зразками оксиду алюмінію, зваженими на вагах, поміщали в мікрохвильову піч для проведення експериментів з сушіння та нагрівання за заданих параметрів. Через інтервали часу 20 с матеріал витягувався, після чого вимірювали температуру на поверхню та основі і масу, потім зразок поміщався назад в мікрохвильову камеру для подальшої обробки. На рис. 4 наведені ваги, що використовувались в експерименті, а також внутрішній вигляд мікрохвильової камери.

Для визначення характеру зміни середньо-інтегральних вологовмісту і температури в процесі сушіння для кожного матеріалу проводили серію з трьох дослідів з зразками з однаковими масами, початковим вологовмістом і розмірами комірки, але при різній тривалості сушіння (у кожному наступному досліді матеріал витримувався в камері довше на визначений інтервал часу). Після закінчення кожного дослідів зразок виймали з камери і вимірювали температуру і масу. Вимірювання температури здійснювалося за допомогою пірометра. Потім зразок зважували для визначення його маси в кінці процесу сушіння. Аналогічні серії дослідів проводили і при інших розмірах, масах, початкових вологовмістах зразка, потужності магнетрона.

У табл. 1 наведено значення діелектричних характеристик, що використовувались в теплових

розрахунках [11], у табл. 2 – теплофізичні властивості для щільних матеріалів [13].

3. Результати експериментів та обговорення

Розрахунок темпу нагрівання та ККД камери представлений у табл. 3. Для розрахунку ККД

камери використовувалися дані по температурі, отримані на дні пластини. Дані наведені для ділянки, де спостерігалось зростання температури. Значення ККД камери показують, що енергія мікрохвильового випромінювання лише частково перетворюється на внутрішню енергію матеріалу, що пов'язано з малим завантаженням камери.



Рисунок 4 – Підготовка до проведення експерименту по визначенню ефективності нагрівання порошку оксиду алюмінію в мікрохвильовій камері

Таблиця 1 – Діелектричні властивості щільного шару оксиду алюмінію [11]

$t, ^\circ\text{C}$	25	200	400	600	800	990	1090	1280	1360
ϵ'	9,8	10,0	10,3	10,7	11,0	11,4	11,6	12,0	12,2
ϵ''	0,026	0,032	0,034	0,049	0,069	0,124	0,189	0,444	0,632

Таблиця 2 – Теплофізичні характеристики оксиду алюмінію в залежності від температури [13]

$t, ^\circ\text{C}$	20	500	1000	1200	1400	1500
$C_p, \text{Дж/кгК}$	775	1165	1255	1285	1315	1330
$\lambda, \text{Вт/мК}$	33	11,4	7,22	6,67	6,34	6,23

Таблиця 3 – Розрахункові характеристики нагріву в МХ поле порошку оксиду алюмінію зі зв'язуючи ПВС. Маса 170 г, вихідна потужність магнетрону $P = 400 \text{ Вт}$

№	$\tau, \text{с}$	$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$(\Delta t/\tau)_{\text{пов}}, \text{К/с}$	$t_{\text{дно}}, ^\circ\text{C}$	$(\Delta t/\tau)_{\text{дно}}, \text{К/с}$	ККД камери, %
1	0	20	-	20	-	-
2	20	24,6	0,23	27,4	0,37	13
3	40	36,9	0,615	41,0	0,68	23
4	60	46,7	0,49	51,6	0,53	18
5	80	58,5	0,65	59,9	0,415	14
6	100	88,5	1,5	88,3	1,1	48
7	120	115,6	0,635	117,7	1,47	50
8	140	128,3	0,635	128,6	0,55	37
9	160	141,1	0,64	144,3	0,79	30
10	180	163,2	1,1	171,2	1,35	46
11	200	178,1	0,745	183,6	0,62	21

Звертає на себе увагу, що при 100 с темп нагрівання посилюється, що ймовірно пов'язано з підвищенням діелектричних властивостей оксиду алюмінію зі зростанням температури. Проте далі темп нагрівання знижується, що пояснюється збі-

льшенням виходу вологи та відповідного винесення потоку теплоти з шару матеріалу. Експерименти також проведені для різних значеннях мас та отримано, що ККД досягає максимального значення 78 % (рис. 5), досягає при масі 250 г.

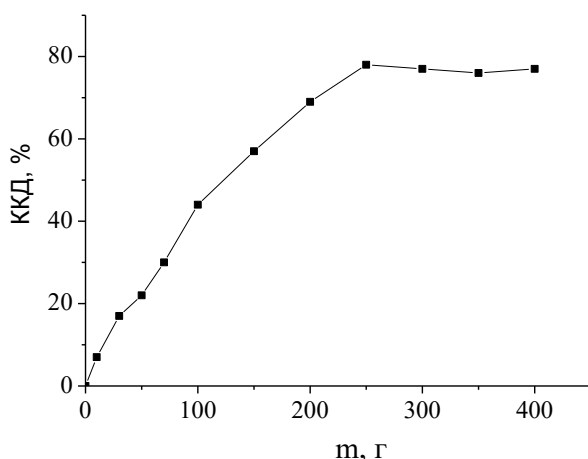


Рисунок 5 – Залежність ККД мікрохвильової камери від маси завантаження зразків на основі оксиду алюмінію

Теплові розрахунки використовувались для отримання даних на значенням напруженості електричного поля, для чого необхідні відомості щодо теплофізичних властивостей матеріалу. Кількість тепла, що виділяється в одиниці об'єму матеріалу, визначається наступною залежністю [14]:

$$q = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \text{Вт} / \text{м}^3 \quad (1)$$

де q – кількість тепла, яке визначається за тепловими розрахунками; E – напруженість зовнішнього електричного поля, В/м; f – частота, МГц; ε' – відносна діелектрична постійна, або діелектрична проникність; δ – кут діелектричних втрат.

Напруженість електричного поля відповідно (1) визначається залежністю:

$$E = \sqrt{\frac{q}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \operatorname{tg} \delta}}, \text{Вт} / \text{м} \quad (2)$$

При обробці експериментальних даних визначено, що оптимальне значення $q = 3,86 \cdot 10^6$ Вт/м³, тоді за даними по діелектричним властивостям та враховуючи, що $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$, отримуємо:

$$E = \sqrt{\frac{3,86 \cdot 10^6}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,030}} = 30736 \text{ Вт} / \text{м}$$

З метою масштабування та переходу від експериментальних даних до промислових установок рекомендується орієнтуватись на отримане значення напруженості електричного поля в МХ камері.

4. Висновки

Вивчення енергоефективності спікання порошків оксиду алюмінію є принципово важливим як для економії енергії, так і для розвитку всієї галузі технічної кераміки внаслідок того, що застосування виробів з на основі Al_2O_3 дуже широке: електронні компоненти та підкладки, високотемпературні електричні ізолятори, високовольтні ізолятори. Проте виготовлення виробів складної форми за використання енергії мікрохвильового поля є складним внаслідок складності управління процесом нагрівання та високої можливості виникнення тріщин. Рационально використання мікрохвильового нагріву при виробництві плоских керамічних підкладок, що широко використовуються в сучасній техніці для виготовлення гібридних інтегральних схем, силових напівпровідникових приладів мікрохвильового діапазону.

З метою масштабування та переходу від експериментальних даних до промислових установок рекомендується орієнтуватись на значення напруженості електричного поля в МХ камері $E = 307036$ В/м для сировини на основі порошку Al_2O_3 зі сполучним полівініловий спирт. Результати отримані при наступному відсотковому співвідношенні компонентів: 60-75 % Al_2O_3 (масова частка), 2-5 % (від маси Al_2O_3) ПБС, 20-35 % – дистильована вода. Максимальне значення теплового ККД камери 78 % досягається при масі завантаження 250 г.

Література

1. **Agrafiotis C., Tsoutsos T.** Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review // Applied Thermal Engineering. – 2001. – Vol. 21, no. 12. – P. 1231–1249. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(01\)00006-0](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(01)00006-0).
2. Ceramic Manufacturing Industry (CER BREF) – EIPIE. URL: https://eipie.eu/the-sevilla-process/brefs/ceramic-manufacturing-industry-cer-bref/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 01.04.2026)
3. **Pletnev P., Nepochatov Y.** Film casting technology for aluminium oxide ceramic substrates // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 460. – P. 10032. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346010032>.
4. Alumina – Al_2O_3 . Precision Ceramics. URL: <https://precision-ceramics.com/materials/alumina/> (дата звернення 01.04.2026)
5. **Karayannis V. G.** Microwave sintering of ceramic

- materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 161. – P. 012068. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012068>.
6. **X. Li et al.** Energy efficient sintering of high-performance ceramics // Journal of Advanced Ceramics. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.26599/jac.2025.9221186>.
7. **B. Aman et al.** Energy-Efficient Microwave Sintering of Binder-Jetted Alumina // Journal of the American Ceramic Society. – 2026. – Vol. 109, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.70691>.
8. **C. Zhao et al.** Hybrid sintering with a tubular susceptor in a cylindrical single-mode microwave furnace // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48, no. 14. – P. 3795-3801. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(00\)00160-9](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(00)00160-9).
9. **H. Curto et al.** Coupling additive manufacturing and microwave sintering: A fast processing route of alumina ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – Vol. 40, no. 7. – P. 2548-2554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.009>.
10. **Belhadj-Tahar N. E., Fourrier-Lamer A., de Chanterac H.** Broad-band simultaneous measurement of complex permittivity and permeability using a coaxial discontinuity // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1990. – Vol. 38, no. 1. – P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/22.44149>.
11. **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>.
12. **W.-J. Miao et al.** Additive Manufacturing of Advanced Structural Ceramics for Tribological Applications: Principles, Techniques, Microstructure and Properties // Lubricants. – 2025. – Vol. 13, no. 3. – P. 112. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants13030112>.
13. **Clarke D. R.** Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 163-164. – P. 67-74. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00593-5](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00593-5).
14. **Yang X. H., Tang J.** Advances In Bioprocessing Engineering. World scientific, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1142/4763>.

Отримана в редакції 01.04.2026, прийнята до друку 24.04.2026

Energy-efficient microwave heating of raw materials for alumina-based technical ceramics

Yevhen Kravchenko

Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: odessaevgeniy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>

The relevance of studying the efficiency of microwave heating of raw materials for technical ceramics based on aluminum oxide (Al_2O_3) has been substantiated, due to the high energy intensity of the ceramic industry and the need to develop energy-efficient thermal processing technologies for ceramic materials. It has been determined that the use of microwave heating can provide volumetric energy absorption by the material, a high heating rate, and the possibility of reducing both temperature and processing time. The object of the study is powder composites based on aluminum oxide with a polyvinyl alcohol binder. Experimental studies were carried out in a microwave chamber with a generation frequency of 2.45 GHz and variable magnetron power. During the experiments, temperature heating regimes, sample mass changes, heating rates, and the efficiency of the microwave chamber were determined. It was established that at the initial stages of heating, the process efficiency is relatively low due to the weak interaction of aluminum oxide with the microwave field. However, as the temperature increases, the dielectric properties of the material improve, leading to intensified heating. The obtained results showed that the efficiency of converting microwave energy into thermal energy significantly depends on the loading mass and processing conditions. It was determined that there is an optimal sample mass at which the efficiency of the microwave chamber reaches its maximum value. Thermal calculations made it possible to estimate the volumetric heat generation density and determine rational values of electric field strength required for effective material heating. The obtained results can be used to optimize microwave sintering modes of aluminum oxide-based ceramic materials and to scale the processes to an industrial level. The study is

aimed at improving the energy efficiency of technical ceramics production and reducing environmental impact.

Keywords: Dielectric properties; Efficiency; Magnetron; Heat; Heating rate; Optimal parameters.

References

1. Agrafiotis, C., & Tsoutsos, T. (2001). Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering*, 21(12), 1231-1249.
2. Ceramic Manufacturing Industry (CER BREF) – EIPiE. Retrieved 01 April 2026 from https://eipie.eu/the-sevilla-process/brefs/ceramic-manufacturing-industry-cer-bref/?utm_source=chatgpt.com.
3. Pletnev, P., & Nepochatov, Y. (2023). Film casting technology for aluminium oxide ceramic substrates. *E3S Web of Conferences*, 460, 10032.
4. Alumina – Al₂O₃. Precision Ceramics. Retrieved 01 April 2026 <https://precision-ceramics.com/materials/alumina/>.
5. Karayannis, V. G. (2016). Microwave sintering of ceramic materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161, 012068.
6. Li, X., Liu, W., Li, L., Liu, X., Li, X., Guo, S., Xu, W., Xu, W., Guo, J., Wang, H., & Randall, C. A. (2025). Energy efficient sintering of high-performance ceramics. *Journal of Advanced Ceramics*.
7. Aman, B., Acharya, S., Gourley, A., Slawewski, T., Agrawal, D., Muley, P. D., & Reeja-Jayan, B. (2026). Energy-Efficient Microwave Sintering of Binder-Jetted Alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 109(4).
8. Zhao, C., Vleugels, J., Groffils, C., Luypaert, P. J., & Van Der Biest, O. (2000). Hybrid sintering with a tubular susceptor in a cylindrical single-mode microwave furnace. *Acta Materialia*, 48(14), 3795–3801.
9. Curto, H., Thuault, A., Jean, F., Violier, M., Dupont, V., Hornez, J.-C., & Leriche, A. (2020). Coupling additive manufacturing and microwave sintering: A fast processing route of alumina ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(7), 2548-2554.
10. Belhadj-Tahar, N. E., Fourier-Lamer, A., & de Chanterac, H. (1990). Broad-band simultaneous measurement of complex permittivity and permeability using a coaxial discontinuity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 38(1), 1-7.
11. 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.
12. Miao, W.-J., Wang, S.-Q., Wang, Z.-H., Wu, F.-B., Zhang, Y.-Z., Ouyang, J.-H., Wang, Y.-M., & Zou, Y.-C. (2025). Additive Manufacturing of Advanced Structural Ceramics for Tribological Applications: Principles, Techniques, Microstructure and Properties. *Lubricants*, 13(3), 112.
13. Clarke, D. R. (2003). Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, 67-74.
14. Yang, X. H., & Tang, J. (2002). Advances In Bioprocessing Engineering. *WORLD SCIENTIFIC*.

Received 01 April 2026

Approved 24 April 2026

Available in Internet 31 May 2026