

УДК 666.3/.7:621.365.5:620.97

<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361458>

**Бошкова І. Л.^{1*}, Волгушева Н. В.², Кравченко Є. О.³,
Крятов А. Г.⁴, Фатєєва К. О.⁵**

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

**E-mail: boshkova.irina@gmail.com*

ORCID iD: ¹ <https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>

² <https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

³ <https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>

⁴ <https://orcid.org/0009-0005-3371-2885>

⁵ <https://orcid.org/0009-0009-0781-0034>

Визначення оптимальних параметрів мікрохвильового нагріву для стадії сушіння порошків оксиду алюмінію

Розглянуті питання підвищення енергоефективності та рівномірності нагріву на початкових стадіях спікання кераміки, оскільки традиційні конвекційні методи характеризуються тривалістю, високим енергоспоживанням і нерівномірністю температурного поля. Досліджено особливості мікрохвильового нагріву порошків оксиду алюмінію на стадії сушіння як критичного етапу перед високотемпературним спіканням технічної кераміки. Проведено експериментальний аналіз впливу потужності магнетрона (240–1000 Вт), маси завантаження (50–300 г) та товщини шару (3–10 мм) на енергетичну ефективність процесу, швидкість нагрівання та рівномірність температурного розподілу. Встановлено, що на початкових стадіях нагрівання визначальну роль відіграють діелектричні втрати води та полівінілового спирту, тоді як сам Al_2O_3 характеризується низькою здатністю до поглинання мікрохвильової енергії. Показано, що недостатня потужність (240 Вт) не забезпечує ефективного проходження енергоємних стадій випаровування та вигорання зв'язуючого. Збільшення маси завантаження до 200–300 г сприяє покращенню електродинамічного узгодження в камері та підвищенню коефіцієнта корисної дії до 81%, забезпечуючи більш стабільний та контрольований нагрів. Виявлено, що збільшення товщини шару до 8 мм є оптимальним компромісом між енергоефективністю та рівномірністю температурного поля. Проаналізовано вплив теплофізичних і діелектричних властивостей матеріалу на формування температурних градієнтів, які можуть призводити до виникнення термічних напружень і дефектів. Обґрунтовано необхідність застосування гібридного нагріву та використання SiC-сусцепторів для підвищення ефективності процесу на низькотемпературних стадіях. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів мікрохвильового сушіння порошку оксиду алюмінію.

Ключові слова: мікрохвильова енергія, експеримент, сушіння, полівініловий спирт, енергетична ефективність, градієнт температури, сусцептор

1. Постановка проблеми. Високотемпературне спікання технічної кераміки, зокрема на основі оксиду алюмінію (Al_2O_3), є ключовим етапом формування її експлуатаційних властивостей – міцності, щільності та термостійкості. Традиційні методи термічної обробки, засновані на конвекційному або радіацій-



ному нагріванні, характеризуються значною тривалістю процесу, високим енергоспоживанням і нерівномірністю температурного поля. У зв'язку з цим все більшої уваги набувають мікрохвильові технології, які забезпечують об'ємне нагрівання матеріалу, суттєве скорочення часу спікання та підвищення енергоефективності процесу [1, 2].

У звичайному спіканні тепловий потік спрямований від гарячого середовища печі до поверхні зразка, а далі – вглиб матеріалу за рахунок теплопровідності. Це означає, що швидкість нагрівання центру та поверхні не є однаковою, особливо для погано теплопровідних або великих заготовок. У результаті формуються температурні градієнти, які можуть уповільнювати денсифікацію в окремих зонах, сприяти неоднорідному росту зерен і створювати передумови для неоднорідної пористості. У оглядовій статті [2] це протиставляється мікрохвильовому спіканню, де нагрів відбувається по всьому об'єму, а отже мікроструктурна еволюція є більш однорідною. У роботі [3] це твердження підтверджено експериментально. Автори зазначають, що в звичайному спіканні для отримання повної щільності зазвичай потрібні висока температура, довша витримка і вища енергоемність, тоді як мікрохвильове спікання дозволяє отримати вищу щільність і кращі механічні властивості при меншому часі процесу. Знижене споживання енергії при мікрохвильовому спіканні поєднується з тоншою мікроструктурою. Разом із тим ефективність мікрохвильового спікання значною мірою визначається не лише фізичними властивостями матеріалу, а й конструктивними особливостями мікрохвильової установки. Однією з основних проблем є нерівномірний розподіл електромагнітного поля в робочому об'ємі камери, що призводить до утворення стоячих хвиль, локальних перегрівів (“гарячих точок”) та температурних градієнтів у зразку. Особливо актуальною ця проблема є для Al_2O_3 , який на початкових стадіях нагрівання слабо поглинає мікрохвильову енергію.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Один із головних критеріїв оцінки будь-якого методу спікання – досягнута відносна щільність. Саме вона визначає залишкову пористість, а через неї – твердість, міцність, тріщиностійкість і довговічність. У роботі [3] для системи Al_2O_3 –SiC встановлено, що мікрохвильове спікання забезпечує вищу щільність порівняно зі звичайним при однаковій температурі 1500 °С. У статтях [4, 5] також підкреслено, що при мікрохвильовому спіканні кераміка може ущільнюватися швидше і за нижчих температур, ніж у звичайних печах, а загальний час нагрівання для ремісничної кераміки зменшувався приблизно до 1 год замість 8–10 год у звичайній печі.

Для технічної кераміки висока щільність сама по собі ще не є достатньою умовою високих властивостей. Критичне значення має і розмір зерен, їх однорідність, наявність залишкових пор та міжзеренної фази. Встановлено [3], що при мікрохвильовому спіканні Al_2O_3 –SiC формується рівномірна агломерація та дрібні зерна в діапазоні 2–3,6 мкм,

У роботі [6] для ATZ-композитів автори теж підкреслюють, що введення малих кількостей CuO, MnO₂ та добавки з нержавіючої сталі покращує денсифікацію без спричинення укрупнення зерна. Особливо це важливо для цирконієво-

алюмінатних композитів, де надмірне укрупнення зерен безпосередньо пов'язане зі зниженням механічної надійності.

Порівняння методів спікання важливе також з точки зору фазового складу. Для Al_2O_3 автори [7] показали, що при досягненні відносної густини близько 0,8 температура, потрібна для мікрохвильового спікання, є нижчою приблизно на 250 °С. Порівняння мікрохвильового і звичайного спікання демонструє ще одну перевагу мікрохвильового нагріву: коротший цикл та об'ємне тепловиділення зменшують імовірність небажаних високотемпературних фазових реакцій [8].

Одним із найчутливіших показників якості спеченої кераміки є твердість, оскільки вона безпосередньо пов'язана з щільністю, розміром зерен і залишковою пористістю. Автори [9, 10] пов'язують це саме з кращою денсифікацією та дрібнішою мікроструктурою при мікрохвильовому нагріванні. Порівняння мікрохвильового та звичайного спікання за показниками густини, мікроструктури та механічних властивостей на підставі даних [3, 6] наведені в таблиці.

Таблиця. Порівняння мікрохвильового та звичайного спікання за показниками густини, мікроструктури та механічних властивостей

Матеріал	Метод спікання	Відносна густина	Розмір зерен / мікроструктура	Твердість	Тріщиностійкість
Al_2O_3 – SiC (10 wt.% SiC)	Звичайне спікання	нижча, ніж при МХ-спіканні	зерна крупніші; більша частка вторинної SiO_2 -фази	нижча, ніж при МХ-спіканні	нижча, ніж при МХ-спіканні
	Мікрохвильове спікання	вища, ніж при звичайному	2–3.6 мкм, дрібнозерниста й рівномірна структура	24.6 Гпа	5.7 МПа·м ^{1/2}
ATZ без до- бавок	Звичайне спікання	для досягнення високої густини потрібна вища температура	більший ризик росту зерен	нижча при однаковій температурі	нижча при однаковій температурі
	Мікрохвильове спікання	висока, але гірша, ніж у леггованих зразків	без різкого укрупнення зерен	підвищується з температурою	підвищується з температурою
ATZ + 0.2 wt.% CuO	Звичайне спікання	для близьких властивостей потрібна вища температура	більш тривалий цикл, вищий ризик коарсингу	нижча при 1250 °С	нижча при 1250 °С
	Мікрохвильове спікання	97% при 1250 °С	щільна структура без укрупнення зерен	13.2 Гпа	6.5 МПа·м ^{1/2}

Наведені дані свідчать, що мікрохвильове спікання в більшості випадків забезпечує вищу відносну густину, дрібніший розмір зерен і кращі механічні властивості порівняно зі звичайним спіканням. Найбільш виражений позитивний ефект спостерігається для Al_2O_3 –SiC композитів і ATZ-кераміки з невеликими добавками CuO, де МХ спікання дозволяє досягти високої щільності й тріщиностійкості вже за нижчих температур і коротших витримок.

Попри наведені переваги, не можна стверджувати, що мікрохвильове спікання автоматично завжди краще за конвективне. У низці систем результати залежать від геометрії зразка, діелектричних властивостей матеріалу, наявності сусцептора, розміру частинок, вмісту другої фази або добавки для спікання, однорідності поля в камері.

У роботі [4], присвяченій мікрохвильовому випалу кераміки, окремо підкреслено, що для високотемпературного нагрівання кераміки критичне значення мають сусцептори, оскільки у багатьох керамік при кімнатній температурі діелектричні втрати дуже низькі, і лише після досягнення критичної температури вони починають ефективно поглинати мікрохвильову енергію. Тобто для багатьох практичних систем мікрохвильове спікання є гібридним, а не повністю “прямим” процесом.

Отже, переваги мікрохвильового спікання реалізуються повною мірою лише за умов оптимального підбору камери, сусцепторів, температурного профілю та складу керамічної системи. Сусцептор – це матеріал, який добре поглинає мікрохвильову енергію і перетворює її на тепло. Використання SiC-сусцепторів полягає у введенні в робочий об’єм мікрохвильової камери елементів із карбиду кремнію, які інтенсивно поглинають мікрохвильову енергію та передають тепло керамічному зразку. Такий підхід забезпечує гібридний механізм нагрівання, підвищує рівномірність температурного поля, полегшує нагрівання оксиду алюмінію на початкових стадіях процесу та зменшує загальну тривалість спікання. Разом із тим конфігурація SiC-сусцепторів повинна бути оптимізована, оскільки неправильне розташування може викликати локальні перегріву та утворення “гарячих точок”. Для Al_2O_3 це важливо, тому що сам оксид алюмінію на низьких і середніх температурах гріється мікрохвилями не дуже ефективно, а SiC нагрівається значно краще. У роботі [11] прямо вказано, що SiC-сусцептори забезпечують швидше та більш рівномірне нагрівання Al_2O_3 завдяки вищим діелектричним і омичним втратам. Під дією мікрохвиль SiC активно поглинає електромагнітну енергію, нагрівається та передає тепло до зразка Al_2O_3 - випромінюванням, конвекцією та теплопровідністю через підставку. SiC-сусцептори застосовують, щоб запустити нагрівання Al_2O_3 на початковій стадії, коли сам оксид алюмінію ще слабо поглинає мікрохвилі, зменшити температурну нерівномірність у зразку, допомогти пройти низькотемпературну область, де Al_2O_3 ще неефективно нагрівається та скоротити загальний час процесу і енергоспоживання. Карбід кремнію використовується саме тому, що він добре працює в мікрохвильовому полі та є термостійким, він витримує високі температури спікання і може виконувати роль активного нагрівального екрана навколо керамічного зразка. SiC розташовують навколо зразка, по периметру робочої зони, у вигляді кільця, рамки, квадратної або шестикутної конфігурації. Проблемою є то, що SiC-

сусцептори не лише допомагають, а й можуть створювати локальні перегріву. У роботі [11] зазначено, що висока електропровідність SiC призводить до концентрації заряду на поверхні, посилення локального електричного поля і появи “гарячих точок”. Тому важлива не тільки наявність сусцептора, а й його форма та розташування.

Метою роботи є експериментальне визначення оптимальних параметрів мікрохвильового нагріву (потужності магнетрона, маси та товщини шару завантаження) для стадії сушіння порошків оксиду алюмінію (Al_2O_3) зі зв'язуючим (полівініловим спиртом), що забезпечують максимальну енергоефективність процесу, рівномірність температурного поля та мінімізацію ризику виникнення температурних градієнтів і термічних напружень у зразках.

Матеріали та методи проведення досліджень. Для визначення оптимальних параметрів мікрохвильового нагріву, а саме потужності магнетрона, маси та товщини шару завантаження для стадії сушіння порошків оксиду алюмінію (Al_2O_3) зі зв'язуючим полівініловим спиртом була проведена серія експериментів. Схема експериментальної установки та методика досліджень наведені в роботі [12]. Вихідна потужність магнетрону змінювалась від 240 Вт до 1000 Вт при масі завантаження 170 г, маса зразка – від 50 г до 300 г при вихідній потужності магнетрону 400 Вт; товщина шару при масі 100 г - від 3 мм до 10 мм.

Аналіз отриманих даних доводить, що при потужності 240 Вт система демонструє більш низьку енергетичну ефективність. Зростання температури відбувається повільно. На етапі випаровування води (починаючи зі 100 °C) та первинної термічної деградації ПВС нагрів забезпечується виключно завдяки високим діелектричним втратам цих допоміжних компонентів. Потужність 240 Вт є критично недостатньою для ініціації процесу мікрохвильового спікання маси у 170 г без застосування додаткових зовнішніх теплоізоляційних матеріалів або сусцепторів. Із поступовим збільшенням потужності час, необхідний для подолання енергоємних бар'єрів випаровування води та ендотермічного вигорання полімерного зв'язуючого, скорочується.

При завантаженні малих мас загальний ККД мікрохвильової камери залишається низьким, більша частина енергії розсіюється у вигляді омичних втрат у самих стінках камери та частково повертається до магнетрона, знижуючи його ресурс. Збільшення маси завантаження оптимізує електродинамічне узгодження, зразок починає все більш відігравати роль ефективного поглиначу, мінімізуючи відбиття електромагнітних хвиль назад до генератора. Для маси 300 г спостерігається найвищий показник ККД камери, який стартує з 21 % на початку процесу та зростає до 81% на фінальних стадіях. Збільшення маси пропорційно збільшує об'єм матеріалу, який здатний поглинати мікрохвильову енергію та зменшує темп нагрівання зразка.

Збільшення товщини шару від 3 до 10 мм загалом підвищує ефективність мікрохвильового нагрівання. Це пояснюється тим, що товстіший шар має меншу питому поверхню тепловіддачі, краще утримує тепло та забезпечує більший активний об'єм, у якому поглинається мікрохвильова енергія. Зі збільшенням товщини шару від 3 до 10 мм ефективність зростає приблизно від 0.29 до 0.34

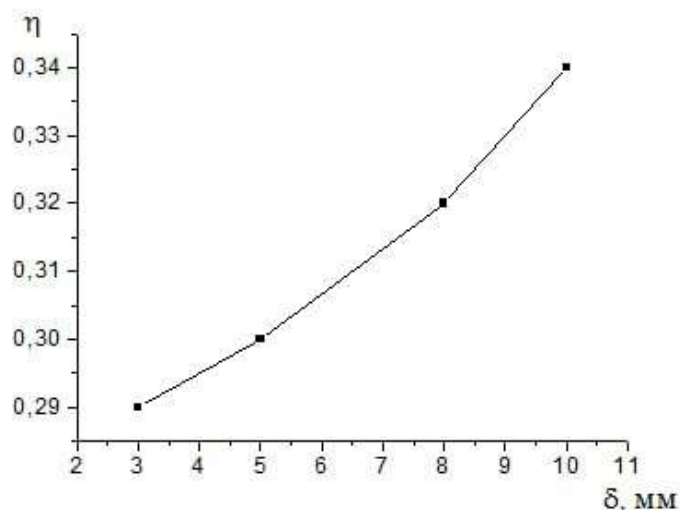


Рис. 1. Залежність максимальної ефективності поглинання енергії мікрохвильового поля від товщини шару

(рис.1), тобто на 16% відносно найтоншого шару. Разом з тим надмірне збільшення товщини створює іншу проблему – зростання температурного градієнта по товщині. Це означає, що, хоча енергоефективність вища, ризик нерівномірного нагріву, локального перегріву внутрішніх зон і термічних напружень також збільшується.

З точки зору максимальної ефективності поглинання енергії найкращим серед розглянутих варіантів є шар 10 мм. Однак з точки зору компромісу між енергоефективністю та рівномірністю нагріву більш доцільним виглядає шар 8 мм, оскільки він дає майже таку ж високу ефективність, як 10 мм, але при меншому ризику надмірних внутрішніх температурних градієнтів.

Результати та обговорення. Проведене експериментальне дослідження виявляє низку критичних вразливостей технології мікрохвильового спікання кераміки в неоптимізованих умовах. Детально аналізуючи поведінку діелектричних параметрів, отриманих з вихідних емпіричних даних, можна стверджувати, що стабільне зростання дійсної частини діелектричної проникності ϵ' від 9.8 при 25 °С до 12.2 при 1360 °С [13] не є тим чинником, що визначає фізику процесу. Ключову роль відіграє фактор діелектричних втрат ϵ'' , який є прямим мірилом конверсії енергії мікрохвильового поля в теплову енергію кристалічної решітки. Збільшення цього показника на два порядки (від 0,026 до 0,632) підтверджує природу оксиду алюмінію: при кімнатній температурі матеріал здатний поглинути лише близько 4% тієї питомої енергії, яку він поглинає при температурі понад 1300 °С.

Саме тому кінетика початкового нагріву цілком і повністю залежить від допоміжних полярних компонентів – води та полівінілового спирту. Вільна і зв'язана вода випаровується в діапазоні 100–180 °С, а структура ПВС зазнає повної термічної деструкції до температури 450 °С, що не спостерігалось в експериме-

нтах. Теплофізичні характеристики ще більше ускладнюють завдання технологічного контролю. Оскільки питома теплоємність невинно зростає з 775 до 1165 Дж/(кг·К) для температурного інтервалу, в якому здійснюється сушіння, для підтримки темпу нагрівання необхідно контролювати поглинуту потужність. Проте одночасне, різке падіння коефіцієнта теплопровідності з 33 до 11,4 Вт/(м·К) призводить до того, що тепло, згенероване в глибоких шарах матеріалу (особливо на дні та в геометричному центрі зразка), фізично не може ефективно транспортуватися до поверхні. Поверхня продовжує інтенсивно охолоджуватися шляхом конвекції та випромінювання. Як результат, різниця температур між зовнішньою поверхнею та дном зразка на фінальних етапах процесу завжди збільшується. Різниця є головним фактором ризику ініціації мікротріщин та руйнування кераміки.

Коефіцієнт корисної дії мікрохвильової камери, який при масі 50 г не перевищував 28 %, для маси 300 г досягав 81 %. Це підтверджує те, що система мікрохвильового спікання стає економічно та енергетично виправданою виключно за умови оптимального завантаження об'єму резонатора. Малі завантаження (50–100 г) не лише призводять до марнотратного розсіювання енергії, але й створює ризики пробою повітряного середовища або пошкодження самого магнетрона відбитою електромагнітною хвилею високої інтенсивності.

З огляду на всі вищевикладені теплофізичні та електродинамічні аспекти, успішне практичне застосування мікрохвильового спікання оксиду алюмінію вимагає переходу до систем гібридного нагрівання. В таких системах мікрохвильовий об'ємний нагрів доповнюється традиційним конвекційним або радіаційним підігрівом поверхні за допомогою зовнішніх резистивних нагрівальних елементів. Гібридний підхід дозволяє штучно підтримувати температуру поверхні на рівні температури дна, ліквідуючи зворотний температурний градієнт. Іншим ефективним методом подолання виявлених проблем є застосування допоміжних радіопоглинаючих матеріалів (сусцепторів), таких як карбід кремнію (SiC), які розташовуються навколо керамічного зразка. Сусцептори активно поглинають мікрохвилі за низьких температур (до 800 °С), випромінюючи тепло на поверхню оксиду алюмінію і допомагаючи йому подолати «мертву зону» діелектричних втрат, після чого починає нагріватися самостійно завдяки механізму теплового розгонення.

Висновки. Завантаження від 200 до 300 г демонструють найвищу енергетичну ефективність і найбільш стабільний, збалансований темп зростання температури, що робить їх пріоритетними для масштабування процесу мікрохвильового спікання в промислових умовах.

Зі збільшенням потужності магнетрона зростає швидкість підвищення температури зразка та скорочується тривалість технологічного циклу. Разом з тим енергоефективність мікрохвильового нагрівання визначається не стільки номінальною потужністю джерела, скільки тією частиною енергії, яка фактично поглинається навантаженням.

На величину поглинутої потужності впливають діелектричні властивості матеріалу, його об'єм, форма та положення в камері.

Підвищення потужності мікрохвильового поля є ефективним лише за умови, що система має достатнє електродинамічне узгодження і матеріал здатний інтенсивно поглинати МХ енергію.

При проектуванні мікрохвильових установок потужність магнетрона слід розглядати разом із геометрією камери, розмірами навантаження та діелектричними характеристиками матеріалу.

Література

1. Mishra R. R., Sharma A. K. A Review of Research Trends in Microwave Processing of Metal-Based Materials and Opportunities in Microwave Metal Casting. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2016. Vol. 41, no. 3. P. 217–255. URL: <https://doi.org/10.1080/10408436.2016.1142421>.
2. A Review of Microwave-Assisted Sintering Technique / L. Ćurković et al. *Transactions of FAMENA*. 2021. Vol. 45, no. 1. P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.21278/tof.451021220>.
3. Madhan M., Prabhakaran G. Microwave versus conventional sintering: Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃–SiC ceramic composites. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2019. Vol. 58, no. 1. P. 14–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.06.001>.
4. Goffé B. Microwave Firing of Ceramics: Developing Homemade Susceptors and Their Practical Applications. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 24. P. 13053. URL: <https://doi.org/10.3390/app152413053>.
5. Spatz M. S., Skamser D. J., Johnson D. L. Thermal Stability of Ceramic Materials in Microwave Heating. *Journal of the American Ceramic Society*. 1995. Vol. 78, no. 4. P. 1041–1048. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08434.x>.
6. Effect of sintering additives on the properties of alumina toughened zirconia (ATZ) / M. K. G. Abbas et al. *MRS Communications*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00400-y>.
7. Brosnan K. H., Messing G. L., Agrawal D. K. Microwave Sintering of Alumina at 2.45 GHz. *Journal of the American Ceramic Society*. 2003. Vol. 86, no. 8. P. 1307–1312. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03467.x>.
8. Agrawal, D. Microwave sintering of ceramic, composites, and metal powders. In *Sintering of Advanced Materials*; Fang, Z.Z., Ed.; Woodhead Publishing Limited: Sawston, UK, 2010; pp. 222–248.
9. Evidence for non-thermal microwave effect in processing of tailing-based glass-ceramics / H.-x. Li et al. *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39, no. 4. P. 1389–1396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.12.056>.
10. Microwave Rapid Sintering of Al-Metal Matrix Composites: A Review on the Effect of Reinforcements, Microstructure and Mechanical Properties / P. Matli et al. *Metals*. 2016. Vol. 6, no. 7. P. 143. URL: <https://doi.org/10.3390/met6070143>.
11. Energy-Efficient Microwave Sintering of Binder-Jetted Alumina / B. Aman et al. *Journal of the American Ceramic Society*. 2026. Vol. 109, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1111/jace.70691>.

12. Бошкова, І. Л., Волгушева, Н. В., Гречановський, А. П., Крятов, А. Г., & Кравченко, Є. О. (2025). Дослідження теплоакумлювальних властивостей цеолітів після мікрохвильової регенерації. *Фізика аеродисперсних систем*, (63), 63–71. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2025.63.338084>.
13. Is direct microwave heating well suited for sintering ceramics? / T. Garnault et al. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, no. 12. P. 16716–16729. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.242>.

Дата надходження: 21.03.2026

Дата прийняття до друку: 27.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

*I. L. Boshkova, N. V. Volgusheva,
Ye. O. Kravchenko, A. H. Kriatov, K. O. Fatieieva*

Determination of optimal microwave heating parameters for the drying stage of alumina powder summary

Summary

The issues of improving energy efficiency and heating uniformity at the initial stages of ceramic sintering are considered, as conventional convective methods are characterized by long processing times, high energy consumption, and non-uniform temperature fields. The features of microwave heating of aluminum oxide (Al_2O_3) powders at the drying stage, as a critical step prior to high-temperature sintering of technical ceramics, are investigated. An experimental analysis of the influence of magnetron power (240–1000 W), load mass (50–300 g), and layer thickness (3–10 mm) on the energy efficiency of the process, heating rate, and temperature distribution uniformity has been carried out. It is established that at the initial stages of heating, dielectric losses of water and polyvinyl alcohol play a decisive role, whereas Al_2O_3 itself is characterized by a low ability to absorb microwave energy. It is shown that insufficient power (240 W) does not ensure effective progression through the energy-intensive stages of evaporation and binder burnout. Increasing the load mass to 200–300 g improves electromagnetic matching in the cavity and raises the efficiency up to 81%, providing more stable and controlled heating. It is found that increasing the layer thickness to 8 mm represents an optimal compromise between energy efficiency and temperature uniformity. The influence of thermo-physical and dielectric properties of the material on the formation of temperature gradients, which may lead to thermal stresses and defects, is analyzed. The necessity of applying hybrid heating and the use of SiC susceptors to enhance process efficiency at low-temperature stages is substantiated. The obtained results can be used to optimize technological regimes of microwave drying of alumina powder.

Keywords: *microwave energy, experiment, drying, polyvinyl alcohol, energy efficiency, temperature gradient, susceptor.*