

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.762:66.017:620.1

Особливості оптимізації параметрів технологічних процесів спікання порошків для технічної кераміки із застосуванням енергії мікрохвильового поля

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>

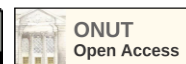
Обґрунтовано актуальність використання мікрохвильового нагрівання як ефективної альтернативи традиційним методам термічної обробки, що характеризуються значною тривалістю процесу, високими енергетичними витратами та нерівномірністю температурного розподілу. На основі аналізу сучасних наукових праць встановлено, що мікрохвильове спікання дозволяє досягти підвищення щільності, міцності та зносостійкості кераміки, а також значного скорочення тривалості технологічного циклу. Наголошується, що ефективність мікрохвильового методу значною мірою залежить від раціонального вибору та узгодження параметрів процесу. Виділено основні керовані параметри оптимізації, серед яких потужність і частота мікрохвильового поля, температура та швидкість нагрівання, тривалість обробки, геометричні характеристики шару порошку та його вологість. Проаналізовано їх вплив на якість кінцевого продукту та енергоефективність процесу. Сформульовано параметри оптимізації, що включають досягнення максимальної щільності та однорідності структури кераміки при мінімальній пористості, зниження енергетичних витрат і тривалості процесу, а також мінімізацію дефектів. Розроблено алгоритм розв'язання задачі оптимізації, що передбачає визначення цільових функцій, вибір керованих параметрів, проведення серії експериментів та чисельне моделювання з подальшим аналізом отриманих результатів. Побудовано математичну модель процесу у вигляді багатокритеріальної задачі оптимізації з урахуванням технологічних, фізичних та геометричних обмежень. Підкреслено, що оптимальні режими мікрохвильового нагрівання забезпечують рівномірний розподіл температури в об'ємі матеріалу, зменшення термічних напружень і підвищення якості керамічних виробів при одночасному зниженні енерговитрат. Отримані результати можуть бути використані для розроблення енергоефективних технологій виробництва технічної кераміки та впровадження автоматизованих систем керування процесами спікання.

Ключові слова: Термічна обробка; Температура; Математична модель; Ефективність; Параметри оптимізації

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3390>

© 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

Зростаюча потреба у створенні технічної кераміки з покращеними експлуатаційними характеристиками, такими як висока міцність, термостійкість, зносостійкість та хімічна інертність, обумов-

лює сучасний розвиток матеріалознавства та високотемпературних технологій. Якість кінцевих виробів значною мірою визначається параметрами технологічних процесів обробки порошкових матеріалів, зокрема процесами їх нагрівання та спікання. Традиційні методи термічної обробки, що

базуються на конвективному або радіаційному нагріванні, характеризуються значною тривалістю процесу, високими енергетичними витратами та нерівномірністю температурного поля в об'ємі матеріалу, що може призводити до дефектів структури та погіршення властивостей кераміки. У цьому контексті застосування енергії мікрохвильового поля є перспективним напрямом інтенсифікації теплових процесів. Мікрохвильове нагрівання забезпечує об'ємне та селективне підведення енергії безпосередньо до матеріалу, що сприяє скороченню тривалості обробки, зниженню енергоспоживання та формуванню більш однорідної мікроструктури. Однак ефективність використання мікрохвильових технологій значною мірою залежить від правильного вибору та оптимізації параметрів процесу, таких як потужність мікрохвильового поля, частота, швидкість нагрівання, тривалість обробки, а також фізико-хімічні властивості порошків. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, питання комплексної оптимізації параметрів мікрохвильового нагрівання для різних типів керамічних матеріалів залишаються недостатньо вивченими. Особливо актуальним є встановлення взаємозв'язків між параметрами мікрохвильового впливу та структурно-фазовими змінами в матеріалі, що визначають його кінцеві властивості.

Таким чином, наукова тема, що присвячена оптимізації параметрів технологічних процесів нагрівання порошків для технічної кераміки із застосуванням енергії мікрохвильового поля, є актуальною та своєчасною. Її реалізація сприятиме підвищенню ефективності виробництва керамічних матеріалів, зниженню енергетичних витрат та розширенню можливостей застосування сучасних високотехнологічних матеріалів у різних галузях промисловості.

2. Аналіз наукових праць

Спінання – це процес, у якому міжчастинкові пори в гранульованому матеріалі усуваються шляхом атомної дифузії, зумовленої капілярними силами. Це кращий метод виробництва промислової кераміки [1]. Оптимізацію термічних процесів та вивчення впливу температури спінання при обробці різних типів ZnO варисторів досліджували в роботах [2, 3]. В останні роки проводиться все більше досліджень виготовлення кераміки з використанням технології мікрохвильового спінання,

яка стала актуальною темою у створенні нових матеріалів [5-7]. Дослідження показали, що мікрохвильове спінання має переваги у покращенні властивостей зразка, зниженні температури спінання та економії енергії та часу в порівнянні з іншими методами. В роботі [7] показано, що використання енергії мікрохвильового поля при спінанні оксиду алюмінію та силікагелю дозволяє отримати зразки з більшою щільністю та меншою пористістю в порівнянні з традиційними методами. Оптимізація технологічних процесів у виробництві варисторів на основі переробленого продукту ZnO з акцентом на екологічну стійкість розглянута в роботі [8]. Оцінка характеру поверхні виготовлених та оброблених зразків варисторів ZnO показала, що температура спінання має значний вплив на їхню структуру, особливо при 1200 °C, де спостерігається значне утворення поліедричних зерен з неправильних утворень, порівняно з нижчими температурами (600, 800 та 1000 °C). Час спінання за температури спінання не мав суттєвого впливу на характер поверхні аналізованих зразків варисторів. Однак, за температури 1000 °C з часом спінання 120 хв спостерігалася вища пористість.

Оптимізація функцій процесу спінання кераміки та зниження споживання енергії на основі CFD-моделювання розглядається в роботі [4]. Автори наголошують, що мікрохвильове спінання є ефективним та енергозберігаючим методом переваги якого полягають в першу чергу в сприянні іонній дифузії та подрібненні зерен. В роботі досліджено процес обробки порошків та вплив параметрів мікрохвильового спінання на зниження споживання енергії, а також оптимізовано процес мікрохвильового спінання за допомогою використання нейронних мереж. Автори роботи [5] показали перевагу процесу мікрохвильового спінання, що підвищило в'язкість та пластичність матеріалів.

Спінання порошкових композитів за допомогою мікрохвиль призвело до різкого скорочення часу обробки та забезпечило кращі механічні властивості, як показано в роботі [9]. Якість отриманих виробів визначалась за трьома різними параметрами: механічними властивостями, щільністю спінання та пористістю.

У роботі [10] представлені результати дослідження мікрохвильового нагрівання порошків міді, зміни мікроструктури та щільності під час плавлення, а також кінетику мікрохвильового спінання порошків міді. Визначено, що зменшення розміру

частинок підвищує ефективність та швидкість мікрохвильового нагрівання, при цьому швидкість нагрівання має лінійну залежність від розміру частинок.

Додавання спікаючих добавок забезпечує хорошу функціональність для покращення керамічних матеріалів. У роботі [11] розглянуто вплив різних спікальних добавок, таких як карбіди, бори́ди, нітриди, на мікроструктуру, ущільнення та механічні властивості керамічної матриці ZrO_2 з використанням різних методів спікання, запропоновано підхід до покращення кінцевого продукту.

Дослідження [12] демонструє можливість використання мінімальної кількості оксиду міді, оксиду марганцю та нержавіючої сталі для полегшення низькотемпературного ущільнення ATZ за допомогою мікрохвильового методу. Виявлено, що незалежно від додавання легуючої домішки, всі спечені зразки демонстрували подвійну мікроструктуру, що включало тетрагональну фазу діоксиду цирконію (основна) та оксиду алюмінію (другорядна). Після спікання не спостерігалось утворення моноклінної фази, що свідчить про те, що стабільність тетрагональної фази не була порушена додаванням легуючої домішки, додаванням оксиду алюмінію та методом мікрохвильового спікання. Додавання цих легуючих добавок було корисним для підвищення ущільнення, твердості за Віккерсом та в'язкості руйнування ATZ незалежно від температури спікання.

В роботі [13] показано, що мікрохвильове спікання порівняно зі звичайним нагріванням дозволяє досягти вищої щільності, твердості та модуля Юнга, відмінних властивостей тріщиноутворення та однорідної мікроструктури. Аналіз мікроструктури показав, що зерна оксиду алюмінію суттєво не зросли, що свідчить про те, що частинки цирконію стримують ріст зерен оксиду алюмінію. В роботі [14] методом мікрохвильового спікання була виготовлена композитна кераміка з використанням нано- ZrO_2 та мікронного порошку Al_2O_3 як сировини. Результати показують високу твердість та в'язкість руйнування зразків, спечених при температурі $1550\text{ }^{\circ}C$ протягом 10 хвилин.

Інтенсивне мікрохвильове сушіння керамічних виробів є ефективним і значно скорочує час обробки, однак можуть виникнути труднощі, пов'язані з високою швидкістю різкого виділення водяної пари [15]. Тому важливо враховувати, що якщо процес занадто короткий, зростає ймовір-

ність дефектів та деформацій зерен. Що стосується спікання, то, як вказують автори, скорочення часу порівняно зі звичайною системою склало 66%.

Оптимізація мікрохвильових діелектричних характеристик у складних оксидах металів типу ABX₃ наведена в [16]. Метод виготовлення, концентрація легуючих домішок та кристалічна структура суттєво впливають на електронні властивості матеріалів на основі титану, кремнію та цирконію, таких як $CaTiO_3$, $MgTiO_3$, $MgSiO_3$ та $CaZrO_3$. Зазначається, що комплексні оглядові дослідження мікрохвильових діелектричних матеріалів залишаються обмеженими, а фундаментальний зв'язок між кристалічними структурами та діелектричними властивостями досі не повністю вивчений.

Аналіз літературних даних дозволив зробити висновок, що виробництво технічної кераміки з застосуванням мікрохвильового нагрівання є ефективним та корисним методом, проте дослідження стосовно оптимізації технологічних параметрів нагрівання порошків для виготовлення технічної кераміки дуже обмежені, що обумовлює доцільність проведення робіт в цьому напрямку.

3. Параметри оптимізації технологічного процесу нагрівання порошків для технічної кераміки

Під параметрами оптимізації розуміють технічну або технологічну змінну процесу, значення яких можна змінювати для досягнення найкращого результату. У контексті нагрівання порошків для технічної кераміки з мікрохвильовим полем, такими параметрами оптимізації можуть бути:

1. Потужність мікрохвильового поля впливає на швидкість нагрівання та однорідність прогріву.
2. Час нагрівання визначає, наскільки повно порошок досягає потрібної температури для формування структури.
3. Температура нагріву впливає на фазові перетворення та щільність кераміки.
4. Швидкість нагрівання визначає кінцеву якість виробу. Занадто швидке нагрівання може викликати тріщини, занадто повільне – витрати енергії.
5. Об'єм та форма завантаження впливають на рівномірність розподілу енергії.
6. Режим розподілу енергії (цикл/імпульс) дозволяє контролювати локальний перегрів.
7. Вологість та підготовка порошку впливає

на проникність мікрохвиль та кінцеву структуру матеріалу.

Мета оптимізації – підібрати такі значення цих параметрів, при яких порошок прогрівається рівномірно; структура кераміки однорідна; споживання енергії мінімальне; час процесу мінімальний; зводяться до мінімуму дефекти (тріщини, пористість).

Під оптимізацією параметрів технологічних процесів нагрівання порошків для технічної кераміки із застосуванням енергії мікрохвильового поля розуміють систематичне визначення та регулювання таких параметрів, які забезпечують ефективне, енергозберігаюче та якісне формування керамічних матеріалів під час їх термічної обробки з використанням мікрохвильової енергії. Таким чином, оптимізація означає пошук балансу між швидкістю, економічністю, якістю та енергоефективністю нагрівання порошків, що дозволяє отримати технічну кераміку із заданими властивостями та мінімальними витратами ресурсів.

Головний параметр оптимізації – це комбінація температури, потужності мікрохвиль і часу нагріву, яка забезпечує однорідну структуру кераміки, задані механічні властивості та мінімальні енергетичні витрати.

Взаємозв'язок параметрів мікрохвильового нагрівання порошків для технічної кераміки та їх вплив на якість матеріалу та енергоефективність процесу показаний на рис. 1. Основні технологічні параметри (потужність та частота МХ поля, температура, швидкість нагріву, товщина шару, вологість) безпосередньо впливають на якість кераміки та ефективність нагріву. Автоматизація та контроль, а також рекуперація тепла та рециркуляція

куляція підвищують енергоефективність та стабільність процесу. Правильна комбінація всіх параметрів дозволяє одночасно досягти високої якості матеріалу та мінімізувати енергоспоживання.

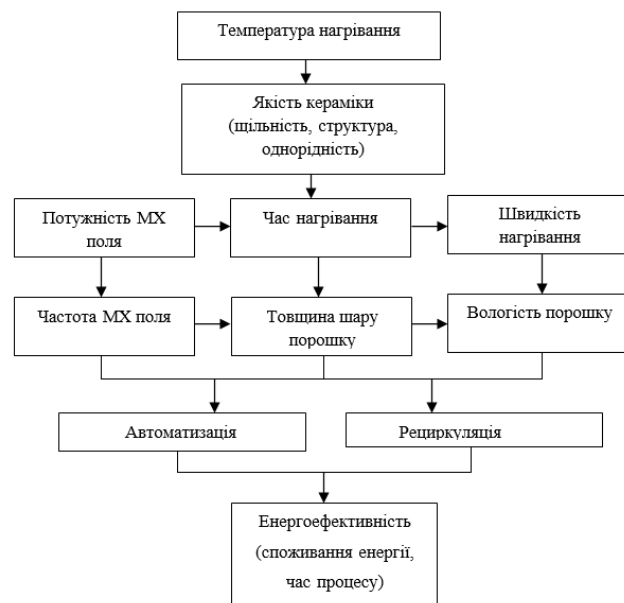


Рисунок 1 – Взаємозв'язок параметрів мікрохвильового нагрівання порошків для технічної кераміки

Основні параметри оптимізації технологічного процесу нагрівання порошків для технічної кераміки з використанням енергії мікрохвильового поля з поясненням їх впливу на якість та ефективність процесу наведені в табл. 1. Таблиця дає комплексне уявлення про те, які параметри підлягають оптимізації та як вони впливають на якість готової кераміки та енергоефективність процесу.

Таблиця 1 – Параметри оптимізації технологічного процесу нагрівання порошків для технічної кераміки з використанням енергії мікрохвильового поля

Параметр оптимізації	Вплив на якість кераміки	Вплив на ефективність процесу
Температура нагрівання	Забезпечує повне спікання порошку, формування щільної та однорідної структури, запобігає перегріву та дефектам	Вищі температури можуть прискорювати процес, але підвищують енергоспоживання; оптимальна температура забезпечує баланс між якістю та енергією
Швидкість нагрівання	Надто швидке нагрівання може викликати термічні напруження, тріщини та неоднорідність структури	Контрольована швидкість дозволяє економити енергію та уникнути додаткових витрат на виправлення дефектів
Потужність мікрохвильового поля	Впливає на рівномірність нагрівання та глибину проникнення у матеріал; оптимальна потужність забезпечує однорідну температуру	Висока потужність скорочує час нагріву, але може збільшити втрати енергії; низька потужність – енергозбереження, але довший цикл

Продовження таблиці 1

Частота мікрохвиль	Визначає ефективність поглинання енергії порошком; неправильна частота може викликати локальні перегріву	Підбір оптимальної частоти дозволяє зменшити час нагрівання та енергоспоживання
Тривалість нагрівання	Недостатній час – неповне спікання, дефекти; надмірний – деградація матеріалу	Оптимальна тривалість забезпечує мінімальне споживання енергії без погіршення властивостей
Вологість та стан порошку	Вологий порошок поглинає мікрохвилі краще, але надмірна вологість може призвести до нерівномірного нагріву	Контроль вологості зменшує нерівномірний розподіл тепла та економить енергію
Геометрія та товщина шару порошку	Впливає на однорідність нагрівання; шари з товщиною більш ніж подвійна глибина проникнення не рекомендуються	Оптимальна товщина зменшує час нагріву та забезпечує рівномірність
Рециркуляція та рекуперація тепла	Не впливає безпосередньо на структуру	Дозволяє повторно використовувати тепло, підвищує енергоефективність процесу
Контроль автоматизацію	Забезпечує точний режим нагрівання, запобігає перегріву та дефектам	Зменшує людський фактор та витрати енергії, забезпечує повторюваність процесу

Оптимізація технологічного процесу нагрівання порошків для технічної кераміки з використанням мікрохвильового поля – це поетапний процес, який поєднує експеримент, моделювання та керування режимами. В якості критеріїв оптимізації необхідно обрати максимальну щільність і однорідність кераміки при мінімальній її пористості і дефектах, мінімальне енергоспоживання, мінімальний час обробки. Керованими параметрами є потужність мікрохвильового випромінювання, температура та швидкість нагрівання, тривалість процесу, товщина шару порошку, вологість і підготовка матеріалу, режим роботи (безперервний або імпульсний). Оптимізація досягається шляхом підбору такої комбінації потужності, температури, часу та режиму нагрівання, яка забезпечує рівномірне об'ємне нагрівання; високу якість кераміки; мінімальні енерговитрати.

4. Алгоритм рішення задачі оптимізації технологічного процесу нагрівання порошків для технічної кераміки

Методика дослідження впливу параметрів технологічного процесу нагрівання порошків для технічної кераміки із застосуванням енергії мікрохвильового поля на якість отриманих зразків базується на комплексному поєднанні експеримен-

тальних і розрахункових методів.

На першому етапі визначаються цільові функції оптимізації, до яких відносяться підвищення щільності та однорідності керамічного матеріалу, зниження пористості, мінімізація енергоспоживання та тривалості процесу нагрівання. В якості обмежень враховуються допустимі температурні режими, технічні характеристики обладнання та фізико-хімічні властивості порошкових матеріалів.

На другому етапі здійснюється вибір керованих параметрів процесу, серед яких основними є потужність мікрохвильового випромінювання, частота електромагнітного поля, швидкість нагрівання, максимальна температура, тривалість обробки, а також геометричні характеристики шару порошку та його вологість.

Експериментальна частина передбачає проведення серії дослідів із варіюванням параметрів у заданих діапазонах із подальшим вимірюванням температурних полів, енергоспоживання та характеристик отриманої кераміки. Паралельно виконується математичне моделювання процесу нагрівання, що включає розв'язання задач теплопереносу та розподілу електромагнітного поля в об'ємі матеріалу. Для цього використовуються чисельні методи, які дозволяють визначити температурні градієнти, зони локального перегріву та оцінити ефективність різних режимів нагрівання.

На основі отриманих експериментальних і розрахункових даних здійснюється оптимізація режимів нагрівання шляхом підбору раціональних значень параметрів, що забезпечують рівномірний розподіл температури, мінімізацію термічних напружень та підвищення якості керамічного матеріалу. Додатково розглядається можливість застосування імпульсного режиму подачі мікрохвильової енергії та комбінованих методів нагрівання.

Для підвищення ефективності процесу впроваджується система автоматизованого керування із використанням зворотного зв'язку за температурою, що дозволяє в режимі реального часу коригувати потужність мікрохвильового випромінювання та запобігати перегріву матеріалу. Оцінка результатів проводиться за показниками щільності, мікроструктури, механічної міцності отриманої кераміки, а також за енергетичними витратами та тривалістю процесу. Отримані результати використовуються для формування рекомендацій щодо оптимальних режимів нагрівання порошків для технічної кераміки із застосуванням мікрохвильового поля.

5. Математична постановка задачі оптимізації

Оптимізація процесу нагрівання порошків для технічної кераміки в мікрохвильовому полі формулюється як задача багатопараметричної оптимізації з урахуванням технічних та фізичних обмежень.

Позначимо вектор змінних (параметрів процесу):

$$x = (P, T, t, \beta, h, W) \quad (1)$$

де P – потужність мікрохвильового випромінювання; T – температура нагрівання; t – тривалість процесу; β – швидкість нагрівання; h – товщина шару порошку; W – вологість матеріалу.

Задача має багатокритеріальний характер, тому її можна подати у вигляді узагальненої цільової функції:

$$\min F(x) = w_1 E(x) + w_2 t + w_3 D(x) - w_4 Q(x) \quad (2)$$

де: $E(x) = P \cdot t$ – енергоспоживання процесу; t – тривалість нагріву; $D(x)$ – зростає при перегріві або великих градієнтах температури, є показником дефектності (наявність тріщин, пористість зразка); $Q(x)$ – залежить від температури та рівномірності нагріву, характеризує кінцеву якість матеріалу

(щільність, міцність, однорідність); w_i – вагові коефіцієнти важливості критеріїв.

Задачею математичної моделі є мінімізування енергоспоживання за часом процесу спікання при мінімальних дефектах кінцевого продукту та максимальній якості (входить зі знаком «–»). Тобто задачу оптимізації можна записати у вигляді: $E(x) \rightarrow \min, t \rightarrow \min, D(x) \rightarrow \min, Q(x) \rightarrow \max$.

Задача вирішується з урахуванням технологічних обмежень (3) та фізичних обмежень (4):

$$\begin{cases} T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \\ t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \beta \leq \beta_{\max} \\ \Delta T(x) \leq \Delta T_{\text{дон}} \end{cases} \quad (4)$$

Перша складова системи (4) для уникнення термічних напружень, друга – обмеження нерівномірності температурного поля.

Геометричні та матеріальні обмеження записуються у вигляді (5):

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Обмеження якості (6):

$$\begin{cases} D(x) \leq D_{\text{дон}} \\ Q(x) \geq Q_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

Загальна постановка задачі приймає вид:

$$x^* = \arg \min F(x), x \in \Omega \quad (7)$$

де Ω – область допустимих значень, визначена системою обмежень.

Таким чином, задача оптимізації полягає у знаходженні такого набору параметрів мікрохвильового нагрівання, який забезпечує максимальну якість кераміки при мінімальних енергетичних і часових витратах, з урахуванням технологічних і фізичних обмежень.

6. Висновки

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що мікрохвильове спікання сприяє формуванню більш однорідної мікроструктури, підвищенню щільності та покращенню механічних властивостей керамічних матеріалів. Ефективність

процесу значною мірою визначається правильним вибором і узгодженням технологічних параметрів.

До основних параметрів оптимізації процесу нагрівання порошків належать потужність і частота мікрохвильового поля, температура та швидкість нагрівання, тривалість процесу, геометричні характеристики шару порошку та його вологість. Розроблено алгоритм розв'язання задачі оптимізації, який базується на поєднанні експериментальних досліджень і математичного моделювання процесів теплопереносу та взаємодії мікрохвильового поля з матеріалом.

Запропоновано математичну постановку задачі у вигляді багатокритеріальної оптимізації з урахуванням технологічних, фізичних та геометричних обмежень. Встановлено, що раціональний підбір параметрів мікрохвильового нагрівання дозволяє забезпечити рівномірний розподіл температури, зменшити термічні напруження, мінімізувати дефекти та підвищити експлуатаційні характеристики технічної кераміки.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення існуючих і розроблення нових енергоефективних технологій виробництва керамічних матеріалів, а також для впровадження автоматизованих систем керування процесами спікання з використанням мікрохвильової енергії.

Література

1. **Chen I. W., Wang X. H.** Sintering dense nanocrystalline ceramics without final-stage grain growth // *Nature*. – 2000. – Vol. 404, No. 6774. – P. 168-171. <https://doi.org/10.1038/35004548>.
2. **Roy S., Das D., Roy T. K.** Influence of sintering temperature on microstructure and electrical properties of Er₂O₃ added ZnO-V₂O₅-MnO₂-Nb₂O₅ varistor ceramics // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 749. – P. 687-696. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.302>.
3. **A. Simo et al.** Improvements in the Electronic Performance of ZnO-Based Varistors by Modifying the Manufacturing Process Parameters // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, No. 24. – P. 4922. <https://doi.org/10.3390/electronics12244922>.
4. **Han G., Zheng N., Wu J.** Function optimization of ceramic firing process and reduction of energy consumption based on CFD simulation // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2729, No. 1. – P. 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2729/1/012003>.
5. **W. Huang et al.** Effect of sintering time on the microstructure and stability of Al₂O₃-ZrO₂ composite powders under microwave-assisted sintering // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49, Is. 6. – P. 8993-8999. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.054>.
6. **Loharkar P. K., Ingle A., Jhavar S.** Parametric review of microwave-based materials processing and its applications. *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8, No. 3. – P. 3306-3326. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.004>.
7. **Ebadzadeh T., Barzegar-Bafroei H.** Synthesis and Sintering of Mullite Ceramics Using Microwave Heating // *Advances in Science and Technology*. – 2010. – Vol. 62. – P. 232-234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ast.62.232>.
8. **P. Liptai et al.** Optimization of technological processes in the manufacturability of varistors based on recycled ZnO product, with emphasis on environmental sustainability // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, No. 16. – P. e35898. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35898>.
9. **Agrawal D.** Latest global developments in microwave materials processing // *Materials Research Innovations*. – 2010. – Vol. 14, No. 1. – P. 3-8. <https://doi.org/10.1179/143307510x12599329342926>.
10. **L. Xu et al.** Study on characteristics of microwave melting of copper powder // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 701. – P. 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.097>.
11. **S. D. Oguntuyi et al.** The effects of sintering additives on the ceramic matrix composite of ZrO₂: microstructure, densification, and mechanical properties – a review // *Advances in Applied Ceramics*. – 2021. – P. 1-17. <https://doi.org/10.1080/17436753.2021.1953845>.
12. **M. K. G. Abbas et al.** Effect of sintering additives on the properties of alumina toughened zirconia (ATZ) // *MRS Communications*. – 2023. – Vol. 13. – P. 618-626. <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00400-y>.
13. **R. Benavente et al.** Mechanical properties and microstructural evolution of alumina-zirconia nanocomposites by microwave sintering // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40, No. 7. – P. 11291-11297.
14. **M. Tinghai et al.** Microstructure and Properties of ZrO₂-AlN Composite Ceramics by Microwave Sintering // *Journal of Inorganic Materials*. – 2021. – P. 150. <https://doi.org/10.15541/jim20210150>.
15. **F. M. Candela, J. A. Aguilar Galeab.** Microwave fast drying and sintering complex morphology of porcelain and gres chamotte 0.5 // *Journal of Cera-*

mic Processing Research. – 2024. – Vol. 25, No. 3. – P. 465-473 <https://doi.org/10.36410/jcpr.2024.25.3.465>.

16. **Supriya S.** A comprehensive review: optimization of microwave dielectric performance in ABX3- type

complex metal oxides // Discover Electronics. – 2025. – Vol. 2, No. 1. – P. 86.

Отримана в редакції 21.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Features of optimization of technological process parameters for powder sintering in technical ceramics using microwave energy

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 using microwave heating as an effective alternative to conventional thermal processing methods, which are characterized by long processing times, high energy consumption, and non-uniform temperature distribution, is substantiated. Based on the analysis of contemporary scientific studies, it has been established that microwave sintering enables an increase in density, strength, and wear resistance of ceramics, as well as a significant reduction in the duration of the technological cycle. It is emphasized that the efficiency of the microwave method largely depends on the rational selection and coordination of process parameters. The main controllable optimization parameters are identified, including microwave power and frequency, heating temperature and rate, processing time, geometric characteristics of the powder layer, and its moisture content. Their influence on the quality of the final product and the energy efficiency of the process is analyzed. Optimization criteria are formulated, including achieving maximum density and structural homogeneity of ceramics with minimal porosity, reducing energy consumption and process duration, as well as minimizing defects. An algorithm for solving the optimization problem has been developed, which involves defining objective functions, selecting controllable parameters, conducting a series of experiments, and performing numerical modeling followed by analysis of the obtained results. A mathematical model of the process is constructed in the form of a multi-criteria optimization problem, taking into account technological, physical, and geometrical constraints. It is highlighted that optimal microwave heating modes ensure uniform temperature distribution within the material volume, reduce thermal stresses, and improve the quality of ceramic products while simultaneously decreasing energy consumption. The obtained results can be used for the development of energy-efficient technologies for the production of technical ceramics and the implementation of automated control systems for sintering processes.

Keywords: Thermal processing; Temperature; Mathematical model; Efficiency; Optimization parameters

References

1. **Chen, I. W., & Wang, X. H.** (2000). Sintering dense nanocrystalline ceramics without final-stage grain growth. *Nature*, 404(6774), 168-171.
2. **Roy, S., Das, D., & Roy, T. K.** (2018). Influence of sintering temperature on microstructure and electrical properties of Er₂O₃ added ZnO-V₂O₅-MnO₂-Nb₂O₅ varistor ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 687-696.
3. **Simo, A., Frigura-Iliasa, F. M., Frigura-Iliasa, M., & Andea, P.** (2023). Improvements in the Electronic Performance of ZnO-Based Varistors by Modifying the Manufacturing Process Parameters. *Electronics*, 12(24), 4922.
4. **Han, G., Zheng, N., & Wu, J.** (2024). Function optimization of ceramic firing process and reduction of energy consumption based on CFD simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2729(1), 012003.
5. **Huang, W., Zhang, Y., Lu, J., Gao, L., Zhang, F., Chen, J., Omran, M., & Chen, G.** (2023). Effect of sintering time on the microstructure and stability of Al₂O₃-ZrO₂ composite powders under microwave-assisted sintering. *Ceramics International*, 49, 6, 8993-8999.
6. **Loharkar, P. K., Ingle, A., & Jhavar, S.** (2019). Parametric review of microwave-based materials processing and its applications. *Journal of Materials Re-*

search and Technology, 8(3), 3306-3326.

7. **Ebadzadeh, T., & Barzegar-Bafroei, H.** (2010). Synthesis and Sintering of Mullite Ceramics Using Microwave Heating. *Advances in Science and Technology*, 62, 232-234.

8. **Liptai, P., Nagy, Š., Dolník, B., Matvija, M., & Pirošková, J.** (2024). Optimization of technological processes in the manufacturability of varistors based on recycled ZnO product, with emphasis on environmental sustainability. *Heliyon*, 10(16), e35898.

9. **Agrawal, D.** (2010). Latest global developments in microwave materials processing. *Materials Research Innovations*, 14(1), 3-8.

10. **Xu, L., Srinivasakannan, C., Peng, J., Guo, S., & Xia, H.** (2017). Study on characteristics of microwave melting of copper powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 701, 236-243.

11. **Oguntuyi, S. D., Johnson, O. T., Shongwe, M. B., Jeje, S. O., & Rominiyi, A. L.** (2021). The effects of sintering additives on the ceramic matrix composite of ZrO₂: microstructure, densification, and mechanical properties – a review. *Advances in Applied Ceramics*, 1-17.

12. **Abbas, M. K. G., Ramesh, S., Tasfy, S. F. H., Lee, K. Y. S., Gul, M., & Aljaoni, B.** (2023). Effect

of sintering additives on the properties of alumina toughened zirconia (ATZ). *MRS Communications*, 13, 618-626.

13. **Benavente, R., Salvador, M. D., Penaranda-Foix, F. L., Pallone, E., & Borrell, A.** (2014). Mechanical properties and microstructural evolution of alumina–zirconia nanocomposites by microwave sintering. *Ceramics International*, 40(7), 11291-11297.

14. **Tinghai, M., Wentao, X., Junrong, L., Tianwen, D., Zixuan, Q., & Youfu, Z.** (2021). Microstructure and Properties of ZrO₂-AlN Composite Ceramics by Microwave Sintering. *Journal of Inorganic Materials*, 150.

15. **Francisco Moreno Candela, Jose Antonio Aguilar Galeab.** (2024). Microwave fast drying and sintering complex morphology of porcelain and gres chamotte 0.5. *Journal of Ceramic Processing Research*. 25(3), 465-473

16. **Supriya, S.** (2025). A comprehensive review: optimization of microwave dielectric performance in ABX₃- type complex metal oxides. *Discover Electronics*, 2(1), 86.

Received 21 February 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026