

УДК 621.039

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.17](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.17)

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF MICROWAVE FIELD ENERGY APPLICATION IN THE SINTERING PROCESS OF ALUMINUM OXIDE AT THE DRYING STAGE

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ У ПРОЦЕСІ СПІКАННЯ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ НА ЕТАПІ СУШІННЯ

Iryna L. Boshkova

boshkova.irina@gmail.com

ORCID: 0009-0009-5599-2709

Natalya V. Volgusheva

natvolgusheva@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9984-6502

Artem G. Kriatov

barsiccc@gmail.com

ORCID: 0009-0005-3371-2885

Andrii P. Hrechanovskyi

grechanovsky62@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8257-5769

Yevhen O. Kravchenko

odessaevgeniy@gmail.com

ORCID: 0009-0009-3446-4958

І. Л. Бошкова,

докт. техн. наук, професор

Н. В. Волгушева,

канд. техн. наук, доцент

А. Г. Крятов,

аспірант

А. П. Гречановський,

аспірант

Є. О. Кравченко,

аспірант

*Odesa National University of Technology, Odesa**Одеський національний технологічний університет, Одеса*

Abstract. The application of microwave field energy in the thermal processing of dielectric materials, in particular materials for the production of technical ceramics, has a number of significant advantages over traditional heating methods (convective, radiative, and contact), manifested in the intensification of heat and mass transfer processes, increased moisture removal rate, and the possibility of controlling the formation of the ceramic matrix structure already at the drying stage. The drying stage in the production of technical ceramics, as a decisive step in powder technology with binders (aqueous or organic), performs two functions: removal of the solvent (water, alcohols, etc.) and preparation for binder burnout, which makes it possible to avoid swelling, cracking, delamination, and explosive destruction of the green body. Therefore, it is advisable to establish optimal microwave drying regimes that ensure process intensification without deterioration of material quality, as well as to determine the energy efficiency of microwave heating at the drying stage. The *purpose of this work* is to determine the feasibility of applying microwave heating in the sintering technology of technical ceramics based on Al_2O_3 powder with polyvinyl alcohol as a binder at the stages of drying and debinding. The *scientific novelty* of the study lies in substantiating the efficiency of drying a material for technical ceramics using aluminum oxide with polyvinyl alcohol as a binder as an example, and in determining the limits of applicability of microwave field energy for the selected type of material. The paper presents data obtained from an experimental investigation of the heating and moisture removal process at different values of material load mass, layer thickness, sample surface area, and magnetron output power, which form the basis for studying drying kinetics and determining the efficiency of microwave energy conversion into thermal energy. The *practical significance* consists in determining the technological parameters of microwave processing of powder materials during drying, in particular the heating rate and the specific power of the microwave field.

Key words: technical ceramics, experimental research, heating rate, specific power, efficiency.

Анотація. Застосування енергії мікрохвильового поля в процесах термообробки діелектричних матеріалів, зокрема матеріалів для виготовлення технічної кераміки, має низку суттєвих переваг порівняно з традиційними методами нагрівання (конвекційними, радіаційними, контактними), які виявляють себе в інтенсифікації тепломасообмінних процесів, підвищенні швидкості видалення вологи та можливості керування структуро-

утворенням керамічної матриці ще на етапі сушіння. Стадія сушіння під час виробництва технічної кераміки як визначальна в порошковій технології зі сполучними (водними або органічними) виконує дві функції: відбувається видалення розчинника (вода, спирти тощо) і підготовка до вигорання сполучного, що дозволяє уникнути спучування, розтріскування, розшарування та вибухового руйнування заготовки. Тому існує доцільність встановлення оптимальних режимів мікрохвильового сушіння, які забезпечують інтенсифікацію процесу без погіршення якості матеріалу, а також визначення енергетичної ефективності мікрохвильового нагрівання на етапі сушіння. *Метою роботи є* визначення доцільності застосування мікрохвильового нагріву в технології спікання технічної кераміки на основі порошку Al_2O_3 зі сполучним – полівініловим спиртом – на етапі сушіння та дебайдингу. *Наукова новизна* проведеного дослідження полягає в обґрунтуванні ефективності сушіння матеріалу для технічної кераміки на прикладі діоксиду алюмінію з полівініловим спиртом як сполученою речовиною та визначенні межі застосовності енергії мікрохвильового поля для обраного виду матеріалу. Наведені дані, отримані за експериментальним дослідженням процесу нагрівання та видалення вологи при різних значеннях маси заправки матеріалу, товщини шару, площі поверхні зразка, вихідної потужності магнетрону, які є підставою для дослідження кінетики сушіння та визначення ефективності перетворення мікрохвильової енергії в теплову. *Практична значимість* полягає в визначенні технологічних параметрів мікрохвильової обробки порошкових матеріалів в процесі сушіння, зокрема темпу нагрівання та питомої потужності мікрохвильового поля.

Ключові слова: технічна кераміка, експериментальні дослідження, темп нагрівання, питома потужність, коефіцієнт корисної дії.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Сучасне виробництво технічної кераміки на основі оксиду алюмінію потребує підвищення енергоефективності технологічних процесів, скорочення тривалості сушіння та спікання, а також покращення фізико-механічних характеристик готових виробів. Традиційні методи конвективного сушіння характеризуються значною тривалістю процесу, нерівномірністю нагрівання та підвищеними енерговитратами, що може призводити до виникнення дефектів (тріщин, внутрішніх напружень, пористості). Перспективним напрямом інтенсифікації тепломасообмінних процесів є застосування енергії мікрохвильового поля, яке забезпечує об'ємний нагрів матеріалу, підвищення швидкості видалення вологи та можливість керування структуроутворенням керамічної матриці ще на етапі сушіння. Подальше вдосконалення та оптимізація мікрохвильової обробки призведе до поглибленого розуміння поведінки мікрохвиль під час взаємодії з матеріалами, розробки математичних співвідношень між різними матеріалами та параметрами мікрохвиль. Під час виробництва технічної кераміки стадія сушіння найчастіше потрібна, та при застосуванні мікрохвильового поля її режим і тривалість можуть істотно відрізнятись від класичної. У порошковій технології зі сполучними (водними або органічними) сушіння виконує дві функції: на етапі сушіння відбувається видалення розчинника (вода, спирти тощо) і підготовка до вигорання сполучного, що дозволяє уникнути спучування, розтріскування, розшарування та вибухового руйнування заготовки. Якщо розчинник не видалити до початку інтенсивного нагрівання, при швидкому випаровуванні всередині зразка виникає високий паровий тиск, що призводить до дефектів виробу. Проте вплив параметрів мікрохвильового опромінення (потужності, частоти,

тривалості обробки) на кінетику сушіння, формування мікроструктури та подальші властивості технічної кераміки на основі оксиду алюмінію потребує детального дослідження. У зв'язку з цим виникає науково-практичне завдання встановлення оптимальних режимів мікрохвильового сушіння, які забезпечують інтенсифікацію процесу без погіршення якості матеріалу, а також визначення закономірностей впливу мікрохвильової енергії на формування структури та експлуатаційних характеристик керамічних виробів. Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та перспективи застосування мікрохвильових технологій у виробництві технічної кераміки.
2. Дослідити кінетику сушіння керамічних заготовок на основі оксиду алюмінію за різних режимів мікрохвильового впливу.
3. Оцінити зміни мікроструктури та пористості кераміки після мікрохвильового сушіння.
4. Обґрунтувати оптимальні параметри мікрохвильового сушіння технічної кераміки на основі оксиду алюмінію.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Потенціал мікрохвиль у обробці матеріалів був виявлений кілька десятиліть тому. Однак, через обмежене розуміння цього явища, їх використання залишалося значною мірою обмеженим лише кількома матеріалами. Можливо, що брак знань про фізику процесів та недостатнє обладнання для оцінки явищ взаємодії мікрохвиль з матеріалами стримували роботу в цій галузі. За останні 65 років мікрохвильова обробка матеріалів стала популярною завдяки своїм потенційним перевагам над традиційними методами. У роботі [1] висвітлено основи мікрохвильової обробки

інженерних матеріалів з акцентом на передові матеріали. Були досліджені різні явища, які раніше не розглядалися в контексті обробки матеріалів, які викликають нагрівання всередині матеріалу під впливом мікрохвиль. Унікальне явище внутрішнього нагрівання, пов'язане з мікрохвильовою енергією, може призвести до продуктів і процесів, які неможливо досягти за допомогою традиційних методів. Поточні дослідження в Університеті Флориди [2] зосереджені переважно на високотемпературній обробці матеріалів, включаючи: спікання кераміки; синтез композитних матеріалів методом горіння; зародження та кристалізація у склі з утворенням склокераміки; поглинання/нагрівання мікрохвиль у композитних матеріалах-гостерах; а також відновлення та переробку електронних відходів. Авторами розробляється модель, яка допоможе прогнозувати поведінку матеріалів у мікрохвильовому полі. Ця модель, заснована на концепції молекулярних орбіталей, успішно прогнозує поведінку води (рідкої, твердої та газоподібної), кремнезему та карбиду кремнію. Одна з характеристик мікрохвиль, яка може мати значний вплив на високотемпературну обробку матеріалів, полягає в тому, що ущільнення деяких керамічних матеріалів може бути досягнуто за нижчих температур і за коротший час, ніж це потрібно при традиційній обробці [3, 4].

У літературі опубліковано численні спостереження щодо покращення масопереносу та швидкості реакцій у твердому стані під час мікрохвильового нагрівання або обробки різноманітних керамічних, скляних та полімерних матеріалів [5, 6]. Ці емпіричні спостереження за покращенням в результаті дії мікрохвильового випромінювання широко називали «мікрохвильовим ефектом». Автори встановили той факт, що сильні мікрохвильові електричні поля індукують нелінійну рушійну силу для масопереносу поблизу поверхонь та структурних інтерфейсів, наприклад, меж зерен, у керамічних матеріалах. Ця рушійна сила може впливати на кінетику реакції, збільшуючи швидкість масопереносу в гетерогенних твердофазних реакціях. Виникає питання – чому зразки, оброблені в мікрохвильовому полі, досягли майже такої ж щільності при 1200°C, як і звичайні зразки при 1400°C. Ймовірно, що однією з причин цих відмінностей може бути явище внутрішнього нагрівання. Коли внутрішні частини зразка дозволяють досягти високої щільності до того, як поверхневі шари ущільняться, внутрішня пористість мінімізується, оскільки менше пор «захоплюється» всередині зразків. Показано, що щільність зразка та однорідність поперечного перерізу щільності збільшувалися, коли розмір зразка збільшувався з 6 до 20 г. Також в роботі [7] визначено, що мікрохвильова обробка досягає того ж ступеня ущільнення, що й спікання в печі, за час, коротший у два рази або більше, і при температурі, нижчій на 5–15%, що пояснюється нетермічним ефектом, який

вивчався протягом багатьох років досліджень з метою розширення застосування мікрохвильового спікання. Подальші дослідження та розробки методів мікрохвильової обробки приведуть до більш ефективного та результативного виробництва широкого спектру матеріалів та виробів. Досліджено [8] вплив тривалості термічної обробки на мікроструктуру та діелектричні характеристики склокераміки. Зі збільшенням часу кристалізації збільшувався розмір та склад кристалічних зерен. Одночасно спостерігалось збільшення максимальної діелектричної проникності та зменшення мікрохвильових втрат. Діелектрична проникність збільшувалася з часом кристалізації, досягаючи свого піку після 24 годин термічної обробки. Склокераміка, яка має високу діелектричну проникність у мікрохвильовому діапазоні, має вирішальне значення для підвищення продуктивності, мініатюризації та ефективності в широкому спектрі високочастотних застосувань, включаючи пристрої зв'язку, датчики, антени, системи візуалізації та рішення для накопичення енергії.

Підхід до моделювання, спрямований на розрахунок критичних коефіцієнтів ефективності перетворення мікрохвильової енергії в тепло для різних робочих умов, представлено в роботі [9]. Порівняння отриманих результатів з результатами, наведеними в літературі, показало, що мікрохвильове нагрівання (МН) може бути більш енергоефективним, ніж конвективне нагрівання (КН). Більше того, з проведених моделювань випливає, що підтримка однакових температур шару адсорбенту в МН та КН для збільшення швидкості потоку газу збільшує споживання енергії в КН та зменшує критичні коефіцієнти ефективності, тим самим покращуючи економічну ефективність МН. Механізми, що беруть участь під час взаємодії мікрохвиль з характерно різними матеріалами – металами, неметалами та композитами (металоматричними композитами, керамогранітними композитами та полімерноматричними композитами), обговорюються з використанням відповідних ілюстрацій в роботі [1]. Цікаво відзначити, що дослідники намагалися обробляти всі основні типи матеріалів – метали, кераміку, полімери та їх композити. Наявність інших «мікрохвильових ефектів», які діють на різні матеріали під час їх «обробки», також визначається в роботі [10]. Здебільшого, фізика мікрохвильової обробки матеріалів залишалася невивченою. Існує багато окремих спроб зрозуміти реакцію різних матеріалів під впливом електромагнітного (ЕМ) поля в області мікрохвиль, що включають електричні та магнітні ефекти. Однак, зі зміною складу матеріалу (що часто спостерігається в передових матеріалах), як того вимагає більшість високотехнологічних застосувань, складність поведінки матеріалу щодо поглинання мікрохвиль також зростає. У [11] розглядається взаємодія матеріалів за допомогою мікрохвиль, основи

обробки мікрохвильовим випромінюванням, механізми нагрівання та поглинання енергії мікрохвиль у різних матеріалах.

Автори дослідження [12] вивчали вплив мікрохвильового опромінення на поглинання тепла подрібненими частинками, що здійснювалось шляхом розробки числової моделі. Моделювання кількісно підтверджено експериментальними результатами щодо теплової ефективності порівняно з ефективністю мікрохвильової обробки. Виявлено, що поглинання тепла більшими частинками значно вище, а розташування частинок має незначний вплив на загальне поглинання енергії.

При застосуванні енергії мікрохвильового поля на стадії сушіння під час виробництва технічної кераміки режим і тривалість обробки можуть істотно відрізнятися від класичної [13] та дозволяє уникнути спучування, розтріскування, розшарування та вибухового руйнування заготовки [14]. Якщо розчинник не видалити до початку інтенсивного нагрівання, при швидкому випаровуванні всередині зразка виникає високий паровий тиск, що призводить до дефектів виробу. Таким чином, існує потреба у всебічному розгляді явищ, пов'язаних з обробкою матеріалів мікрохвильовим випромінюванням, зокрема сушіння.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення доцільності застосування мікрохвильового нагріву в технології спікання технічної кераміки на основі порошку Al_2O_3 зі зв'язувальною речовиною – полівініловим спиртом (ПВС) – на етапі сушіння та дебайдингу.

Об'єктом дослідження є процес сушіння та спікання технічної кераміки на основі оксиду алюмінію із застосуванням мікрохвильової енергії.

Предметом дослідження є закономірності та параметри впливу енергії мікрохвильового поля на кінетику сушіння, енергоефективні параметри сушіння технічної кераміки на основі оксиду алюмінію.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

При виробництві технічної кераміки застосовують сполучні, головне завдання яких – "склеювати" частинки порошку і таким чином зберігати форму після пресування. Відсутність сполучного призведе до того, що заготівля кришиться, а сам зразок не триматиме форму. Відомо, що гарне сполучне збільшує допустимі швидкості нагрівання та значно зменшує ймовірність виникнення тріщин. Кращим сполучним вважається полівініловий спирт (ПВС), оскільки він забезпечує хорошу адгезію з Al_2O_3 , легко розчиняється у воді, а також є дешевий та стабільний. Оптимально додавати 3–6% ПВС перед пресуванням. При дії енергії мікрохвильового поля на Al_2O_3 + ПВС температура матеріалу підвищується, проте гріється сполучна, а не оксид алюмінію, оскільки оксид алюмінію практично прозорий для мікрохвильового діапазону.

Розігрів оксиду алюмінію у мікрохвильовій камері вище 300°C можливий, якщо використовувати сусцептор (наприклад, SiC, графіт).

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, схема якої представлена на рис. 1. Для рівномірного нагрівання матеріалу застосовують його переміщення за об'ємом робочої камери.

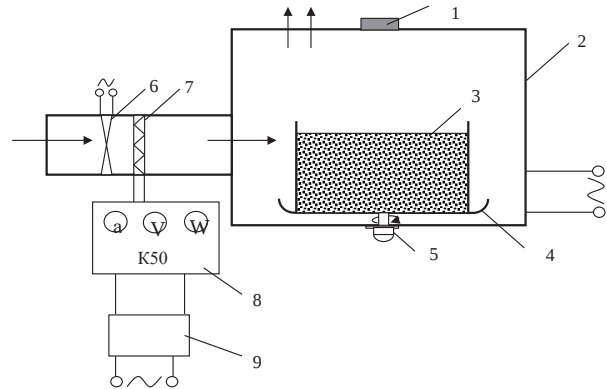


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження процесу сушіння в мікрохвильовому полі [15]
1 – хвилевід; 2 – робоча камера; 3 – експериментальна комірочка; 4 – підставка; 5 – механізм приводу; 6 – вентилятор; 7 – нагрівач; 8 – вимірювальний комплект; 9 – регулятор напруги

В експериментальну комірочку поміщався досліджуванний матеріал, який оброблявся в мікрохвильовій камері. Через інтервали часу 30 с матеріал витягувався, після чого вимірювали температуру і масу, потім зразок поміщався назад в мікрохвильову камеру для подальшої обробки. 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°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. Формування зразків проводилося шляхом пресування в керамічних прямокутних вогнетривких тиглях різних розмірів, що дозволяло визначати вплив маси та товщини зразка на кінетику процесу сушіння.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ, ОБРОБКИ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

Для визначення характеру зміни середньоінтегральних вологовмісту і температури в процесі сушіння для кожного матеріалу проводили серію з трьох дослідів з зразками з однаковими масами, початковим вологовмістом і розмірами комірочки, але при різній тривалості сушіння (у кожному наступному досліді матеріал витримувався в камері довше на інтервал часу). Після закінчення кожного дослід

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.

Результати експериментів оброблялися в такий спосіб. Визначалася кількість води, що випарувалася, за період перебування в МХ камері як різницю між початковою і кінцевою масою:

$$\Delta m = m_n - m_k, \text{ кг} \quad (1)$$

Потім розраховувався вологовміст зразка за формулою:

$$u = \frac{m_k - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}}, \text{ кг/кг}, \quad (2)$$

$m_{\text{сух}}$ – маса абсолютно сухого матеріалу, яку можна розрахувати, знаючи початкову масу m_n та його початковий вологовміст u_0 :

$$m_{\text{сух}} = \frac{m_n}{1 + u_0}. \quad (3)$$

Швидкість сушіння розраховувалася за значеннями вологовмісту на початку u_n і наприкінці u_k цього періоду та його тривалості $\Delta \tau$:

$$W = \frac{\Delta m}{m_{\text{сух}} \cdot \Delta \tau} = \frac{u_n - u_k}{\Delta \tau}, \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Встановлено, що при зменшенні маси завантаження нижче деякого значення кількість мікрохвильової енергії, перетвореної матеріалом на теплову, суттєво зменшується. В експериментах досліджувалися зразки масою від 10 до 100 г, товщиною 5-8 мм. Одне з основних питань, що вимагає вирішення для оцінки ефективності використання потужності, що підводиться – визначення ККД камери в залежності від її завантаження. Допустиме завантаження обмежене за нижньою межею умовами роботи МХ-генератора та ефективністю використання енергії, по верхньому – масою матеріалу, збільшення якої призводить до подовження процесу. Показниками, що характеризують режими роботи МХ пристроїв, є ефективність використання електроенергії та потужність $Q_{\text{кор}}$, яка йде на зростання температури зразка та випаровування води. Ці показники визначають коефіцієнти корисної дії магнетрону η_m , камери η_k та коефіцієнт використання теплової енергії η_r . ККД магнетрону визначається наступним співвідношенням:

$$\eta_m = \frac{P_{\text{вих}}}{P} \quad (5)$$

де $P_{\text{вих}}$ – вихідна потужність магнетрону, Вт; P – потужність, що споживається від мережі.

Для визначення ККД камери і теплового ККД необхідно знати теплову енергію, що генерується в продукті під дією МХ-поля $Q_{\text{зр}}$, корисно використовувану теплоту $Q_{\text{кор}}$, а також втрати в навколишнє

середовище $Q_{\text{навк}}$ за рахунок променистого $Q_{\text{пром}}$, конвективного Q_k теплообміну і втрати на нагрівання діелектричної комірки $Q_{\text{ком}}$ в якій міститься матеріал:

$$Q_{\text{навк}} = Q_k + Q_{\text{пром}} + Q_{\text{ком}}. \quad (6)$$

У зв'язку з виникненням в результаті нагрівання перепаду температур між оброблюваним матеріалом та навколишнім середовищем зразок втрачає певну кількість теплоти. Отже, теплову енергію, що генерується у зразку, можна визначити як суму її складових:

$$Q_{\text{зр}} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{навк}}. \quad (7)$$

Втрати в довкілля шляхом конвективного теплообміну визначаються залежністю Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha \cdot \Delta t \cdot F, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Δt – різниця температур поверхні матеріалу і навколишнього середовища (повітря в МХ камері), F – площа поверхні зразка.

Кількість теплоти, яка була витрачена на випаровування води з матеріалу:

$$Q_{\text{вип}} = \frac{m_w \cdot r}{\tau}, \quad (9)$$

де m_w – маса води, що випарувалася, кг; r – питома теплота пароутворення, τ – час.

Кількість теплоти, що витрачається на нагрівання матеріалу:

$$Q_i = \frac{\bar{m} \cdot c_p \cdot \Delta t}{\tau} \quad (10)$$

де c_p – теплоємність матеріалу, $\bar{m}$ – середня за період сушіння маса зразка.

Коефіцієнт корисної дії камери розраховується за наступною залежністю:

$$\eta_k = Q_{\text{кор}} / P_{\text{вих}} \quad (11)$$

Зі збільшенням втрат теплоти знижується коефіцієнт використання теплової енергії η_r , який визначається наступним співвідношенням:

$$\eta_r = Q_{\text{кор}} / Q_{\text{зр}}. \quad (12)$$

Корисно використовувана теплота визначається як сума кількостей теплоти, що витрачаються на нагрівання матеріалу і випаровування води в процесі сушіння. Отримані експериментальні дані дозволяють визначити величину теплоти, що корисно використовується $Q_{\text{кор}}$.

При визначенні величин втрат теплоти приймалися такі умови:

– фізичні властивості матеріалу комірки та навколишнього середовища в МХ-камері постійні;

– постійні температури оброблюваного матеріалу; комірки, що розташована в МХ-полі; стінок камери, що дорівнює температурі навколишнього середовища (повітря) у камер.

Були проведені експерименти щодо визначення маси (або об'єму) завантаження, при якій ККД камери стає максимальним для даного виду матеріалу. Теплофізичні та електрофізичні властивості оксиду алюмінію приймалися згідно [14].

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження процесу сушіння оксиду алюмінію з ПВС проведені при різних значеннях маси загрузки матеріалу m – від 10 г до 100 г, товщини шару δ – від 7 мм до 15 мм, площі поверхні зразка F – від

0,00078 м² до 0,0083 м², вихідної потужності магнетрону $P_{\text{вих}}$ – від 180 до 400 Вт. Отримані дані були основою отримання даних по кінетиці сушіння та визначення ефективності перетворення мікрохвильової енергії в теплову. Типові первинні дані наведені в табл. 1–2.

Таблиця 1. Результати дослідження процесу сушіння зразка Al_2O_3 +ПВС в мікрохвильовому полі. $\delta=8$ мм; $P_{\text{вих}}=240$ Вт; $m=0,07$ кг

t	$\Delta m \cdot 10^3$, кг	$\bar{u}$, кг/кг	$\bar{t}$, °C
0	0	0,455	21
30	0,3	0,443	103
60	1,1	0,364	165
90	0,9	0,322	165
120	1,9	0,220	156
150	1,6	0,106	148
180	0,7	0,029	136
210	0,1	0,017	129
240	0	0	123

Таблиця 2. Результати дослідження процесу сушіння зразка Al_2O_3 +ПВС в мікрохвильовому полі. $\delta=8$ мм; $P_{\text{вих}}=180$ Вт; $m=0,07$ кг

t	$\Delta m \cdot 10^3$, кг	$\bar{u}$, кг/кг	$\bar{t}$, °C
0	0	0,455	21
30	0,3	0,441	69
60	0,8	0,401	107
90	1,0	0,339	111
120	1,2	0,267	105
150	0,8	0,210	99
180	1,1	0,133	91
210	1,4	0,054	86
240	0,5	0,019	82

Експерименти довели, що при сушінні зразків масою від 10 г до 40 г навіть при потужності 180 Вт якості зразків є незадовільною: спостерігались тріщиноутворення, а при $m=10$ г – навіть активне розкладання та обуглювання органічного сполучного ПВС. Після розкладання ПВС вуглець, що утворюється починає активно поглинати мікрохвильову енергію, в результаті спостерігалось стрибкоподібне нагрівання і руйнування зразка. На рис. 2 наведені криві, які отримані для мас 100 г, 90 г, 80 г та 70 г при потужності $P_{\text{вих}}=240$ Вт. В даних режимних параметрах були отримані зразки з необхідною якістю.

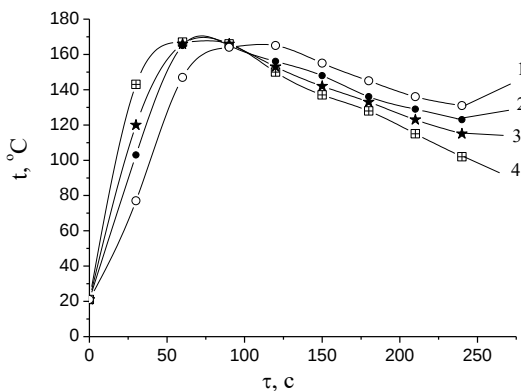


Рис. 2. Середня температура поверхні зразків $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ при мікрохвильовому сушінні. $P_{\text{вих}}=240$ Вт, $\delta=8$ мм. 1 – $m=100$ г, 2 – $m=90$ г, 3 – $m=80$ г, 4 – $m=70$ г

Видно, що у всіх зразках максимальна температура становила 164–166 °C. При досягненні цієї температури волога практично видалена і далі мікрохвильова енергія дедалі менше поглинається матеріалом. Як показують температурні криві, температура зразків знижується, причому темп охолодження залежить від завантаження. Частка поглиненої мікрохвильової енергії знижується, а частка енергії, що йде у навколишнє середовище, збільшується.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз стану зразків показав, що темп нагріву від 1,87 К/с (питома потужність мікрохвильового поля 2,4 Вт/г) до 4,07 К/с (питома потужність мікрохвильового поля 24 Вт/г) у перші 30 с не призводить до погіршення якості кінцевого виробу. Далі для всіх зразків спостерігалась ділянка постійної швидкості сушіння, для якої спостерігалась незначна зміна температури. Після цього періоду вимикався магнетрон, щоб не допустити розкладання ПВС. Таким чином, сушіння досліджуваного матеріалу має проходити менш інтенсивно. Отримано, що при завантаженні семи однакових зразків масою 100 г темп нагрівання становив 0,14 К/с, питома потужність мікрохвильового поля $P=0,24$ Вт/г. Огляд літератури показав, що при нагріванні в мікрохвильовому полі до 80–120 °C видаляється адсорбована волога, на рівні температур 250–300 °C відбувається активне розкладання полівінілового спирту, обуглювання та виділення газів [16]. Характер зміни ККД камери від відносного об'єму матеріалу описується залежністю (13), отриманої під час обробки експериментальних даних:

$$\eta_k = 0,78 \left(1 - \frac{3,87}{4,34 + e^{11 \cdot 2V_m/V_k}} \right) \quad (13)$$

де V_k – об'єм МХ камери, м³, V_m – сумарний об'єм матеріалу.

Після стадії сушіння рекомендується етап дебайдингу, тобто видалення ПВС. Оскільки Al_2O_3 практично не поглинає мікрохвильове випромінювання, недоцільно використовувати мікрохвильове поле. Слід застосовувати інші способи нагрівання. Цей процес має бути дуже повільним та контрольованим. Рекомендована схема дебайдингу з вентиляцією представлена у табл. 3.

Після 500 °C органіка повністю видалена. Рекомендується робити витримки (плато) за 200–250 °C і за 350–400 °C, що дозволяє газам виходити без розриву структури. Пропонований режим: 20–150 °C – видалення вологи (темп нагріву – 0,14 К/с), 150–300 °C – початок розкладання сполучного (темп нагріву – 0,5 К/с), 300–500 °C – повне випалювання органіки (темп нагріву – 0,7 К/с).

Таблиця 3. Рекомендована схема дебайдингу з вентиляцією

Етап	Температура	Швидкість	Тривалість
I	120–165 °C	0,14 К/с	1 ч
II	200–300 °C	0,5–1 К/с	1–2 ч
III	300–500 °C	0,7–1 К/с	1 ч

ВИСНОВКИ

В технології виробництва технічної кераміки найчастіше потрібна стадія сушіння, при застосуванні мікрохвильового поля її режим і тривалість можуть істотно відрізнятися від класичної. У порошковій технології зі сполучними (водними або органічними) сушіння виконує дві функції: на етапі сушіння відбувається видалення розчинника (вода, спирти тощо) і підготовка до вигорання сполучного, що дозволяє уникнути спучування, розтріскування, розшарування та вибухового руйнування заготовки.

В умовах сушіння в мікрохвильовому полі порошку Al_2O_3 зі сполученням ПВС масою від 10 г до 40 г при потужності 180 Вт спостерігається тріщиноутворення, при $m=10$ г спостерігається активне розкладання та обуглювання органічного сполучного ПВС. Після розкладання ПВС спостерігається утворення

вуглецю, який активно поглинає мікрохвильову енергію, в результаті чого зразок стрибкоподібно нагрівається та руйнується.

При сушінні в мікрохвильовому полі потужністю $P_{\text{вих}}=240$ Вт зразків масою 100 г, 90 г, 80 г та 70 г товщиною 8 мм якість кінцевого виробу задовільна.

При темпу нагріву від 1,87 К/с (питома потужність мікрохвильового поля 2,4 Вт/г) до 4,07 К/с (питома потужність мікрохвильового поля 24 Вт/г) у перші 30 с не призводить до погіршення якості кінцевого виробу. Далі для всіх зразків спостерігається ділянка постійної швидкості сушіння, для якої температура змінюється незначно. При завантаженні семи однакових зразків масою 100 г темп нагрівання становив 0,14 К/с, питома потужність мікрохвильового поля $P=0,24$ Вт/г, що підвищувало якість кінцевого виробу.

REFERENCES

- [1] Mishra, R. R., & Sharma, A. K. (2016). Microwave–material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 81, 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>.
- [2] Clark, D. E., Folz, D. C., & West, J. K. (2000). Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering: A*, 287(2), 153–158. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00768-1).
- [3] Karamanov, A., Colombini, E., Ferrante, D., Georgiev, I., Raykovska, M., Karamanova, E., Atanasova, S., Veronesi, P., & Leonelli, C. (2025). Benefits of Microwave-Assisted Heat Treatment for Sintered Diopside Glass-Ceramics. *Materials*, 18(2), 421. <https://doi.org/10.3390/ma18020421>.
- [4] Feng, G., Zhou, W., Li, Y., Qing, Y., Luo, F., Zhu, D., Huang, Z., & Zhou, Y. (2019). Lanthanum-substituted $\text{Ba}_{0.4}\text{Ca}_{0.6}\text{Fe}_{1.4}\text{Co}_{0.6}\text{O}_{19}$ ceramics with enhanced microwave absorption. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(1), 621–627. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02567-4>.
- [5] Booske, J. H., Cooper, R. F., & Freeman, S. A. (1997). Microwave enhanced reaction kinetics in ceramics. *Materials Research Innovations*, 1(2), 77–84. <https://doi.org/10.1007/s100190050024>.
- [6] Le, T., Ju, S., Koppala, S., Peng, J., Pan, B., Zhang, L., Wang, Q., & Li, X. (2018). Kinetics study of microwave enhanced reactions between diaspore bauxite and alkali solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 652–663. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.323>.
- [7] Lin, M.-S., & Chu, K.-R. (2025). On the Non-Thermal Mechanisms in Microwave Sintering of Materials. *Materials*, 18(3), 668. <https://doi.org/10.3390/ma18030668>.
- [8] S. Othman^a, Y. H. Lua^b, E. S. Sazali^a, Y. S. Yap^b, R. (2025). Hisam Influence of heat treatment on microwave dielectric properties of erbium doped borotellurite glass ceramics. Advanced Optical Materials Research Group, Department of Physics, *Chalcogenide Letters*, 22(5), 451–459. <https://doi.org/10.15251/CL.2025.225.451>.
- [9] Cherbański, R. (2011). Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion into Heat. *Chemical Engineering & Technology*, 34(12), 2083–2090. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
- [10] Morozov, G., Sedelnikov, Y., Anfinogentov, V., Stakhova, N., & Morozov, O. (2025). Perspective Chapter: Microwave Technological Processes. *Y Electromagnetic Field – From Atomic Level to Engineering Applications [Working Title]*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1009869>.
- [11] El Khaled, D., Novas, N., Gazquez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). Microwave dielectric heating: Applications on metals processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2880–2892. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.043>.
- [12] Shadi, A., Samea, P., Rabiei, M., & Ghoreishi-Madiseh, S. A. (2023). Energy Efficiency of Microwave-Induced Heating of Crushed Rocks/Ores. *Minerals*, 13(7), 924. <https://doi.org/10.3390/min13070924>.
- [13] Nait-Ali, B., Alzina, A., Lauro, N., & Smith, D. S. (2024b). Perspectives in drying of ceramics. *Open Ceramics*, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100554>.
- [14] Inès Ghorbel. (2021). Numerical and experimental study of the heating of alumina under microwave field in hybrid configuration. Application to sintering. Other. Université de Lyon, 2021. English. fNNT : 2021LYSEM021ff.
- [15] Boshkova, I. L., Volgusheva, N. V., Boshkov, L. Z., Bondarenko, O. S., & Grechanovsky, A. P. (2023). Eksperymental'ne doslidzhennya sushinnya tseolitu "4a" v mikrokhvyl'ovomu poli [Experimental study of drying zeolite "4a" in a microwave field]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiya – Refrigeration Engineering and Technology*, 59(3), 197–204 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
- [16] Baklouti, S., Bouaziz, J., Chartier, T., & Baumard, J.-F. (2001). Binder burnout and evolution of the mechanical strength of dry-pressed ceramics containing poly(vinyl alcohol). *Journal of the European Ceramic Society*, 21(8), 1087–1092. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(00)00305-8).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mishra, R. R., & Sharma, A. K. (2016). Microwave–material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 81, 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>.
- [2] Clark, D. E., Folz, D. C., & West, J. K. (2000). Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering: A*, 287(2), 153–158. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00768-1).
- [3] Karamanov, A., Colombini, E., Ferrante, D., Georgiev, I., Raykovska, M., Karamanova, E., Atanasova, S., Veronesi, P., & Leonelli, C. (2025). Benefits of Microwave-Assisted Heat Treatment for Sintered Diopside Glass-Ceramics. *Materials*, 18(2), 421. <https://doi.org/10.3390/ma18020421>.
- [4] Feng, G., Zhou, W., Li, Y., Qing, Y., Luo, F., Zhu, D., Huang, Z., & Zhou, Y. (2019). Lanthanum-substituted Ba_{0.4}Ca_{0.6}Fe_{11.4}Co_{0.6}O₁₉ ceramics with enhanced microwave absorption. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(1), 621–627. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02567-4>.
- [5] Booske, J. H., Cooper, R. F., & Freeman, S. A. (1997). Microwave enhanced reaction kinetics in ceramics. *Materials Research Innovations*, 1(2), 77–84. <https://doi.org/10.1007/s100190050024>.
- [6] Le, T., Ju, S., Koppala, S., Peng, J., Pan, B., Zhang, L., Wang, Q., & Li, X. (2018). Kinetics study of microwave enhanced reactions between diasporic bauxite and alkali solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 652–663. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.323>.
- [7] Lin, M.-S., & Chu, K.-R. (2025). On the Non-Thermal Mechanisms in Microwave Sintering of Materials. *Materials*, 18(3), 668. <https://doi.org/10.3390/ma18030668>.
- [8] S. Othman^a, Y. H. Lua^b, E. S. Sazali^a, Y. S. Yap^b, R. (2025). Hisam Influence of heat treatment on microwave dielectric properties of erbium doped borotellurite glass ceramics. *Advanced Optical Materials Research Group, Department of Physics, Chalcogenide Letters*, 22(5), 451–459. <https://doi.org/10.15251/CL.2025.225.451>.
- [9] Cherbański, R. (2011). Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion into Heat. *Chemical Engineering & Technology*, 34(12), 2083–2090. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
- [10] Morozov, G., Sedelnikov, Y., Anfinogentov, V., Stakhova, N., & Morozov, O. (2025). Perspective Chapter: Microwave Technological Processes. *Y Electromagnetic Field – From Atomic Level to Engineering Applications [Working Title]*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1009869>.
- [11] El Khaled, D., Novas, N., Gazquez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). Microwave dielectric heating: Applications on metals processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2880–2892. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.043>.
- [12] Shadi, A., Samea, P., Rabiei, M., & Ghoreishi-Madiseh, S. A. (2023). Energy Efficiency of Microwave-Induced Heating of Crushed Rocks/Ores. *Minerals*, 13(7), 924. <https://doi.org/10.3390/min13070924>.
- [13] Nait-Ali, B., Alzina, A., Lauro, N., & Smith, D. S. (2024b). Perspectives in drying of ceramics. *Open Ceramics*, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100554>.
- [14] Inès Ghorbel. (2021). Numerical and experimental study of the heating of alumina under microwave field in hybrid configuration. Application to sintering. Other. Université de Lyon, 2021. English. fNNT : 2021LYSEM021ff.
- [15] Бошкова, І. Л., Волгушева, Н. В., Бошков, Л. З., Бондаренко, О. С., & Гречановський, А. П. (2023). Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(3), 197–204. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
- [16] Baklouti, S., Bouaziz, J., Chartier, T., & Baumard, J.-F. (2001). Binder burnout and evolution of the mechanical strength of dry-pressed ceramics containing poly(vinyl alcohol). *Journal of the European Ceramic Society*, 21(8), 1087–1092. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(00)00305-8)

© Бошкова І. Л., Волгушева Н. В., Крятов А. Г., Гречановський А. П., Кравченко С. О.

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)