

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 666.63:537.521

Дослідження високоінтенсивного нагріву при спіканні технічної кераміки

В. О. Потапов¹✉, Н. В. Волгушева², Л. З. Бошков³, Є. О. Кравченко⁴, Д. М. Єрохін⁵¹Державний біотехнологічний університет, вул. Алчевських, 44, Харків, 61000, Україна;²⁻⁵Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹potapov@bigmir.netORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0731-2598>, ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>, ³<http://orcid.org/0000-0002-2196-1519>, ⁴<https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>, ⁵<https://orcid.org/0009-0001-7302-8245>

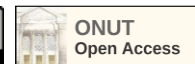
У статті наведено аналіз результатів світових досліджень прогресивних методів термообробки матеріалів у різних технічних галузях та визначено два головних напрямки. Встановлено, що високоінтенсивне спікання має низку переваг, таких як зменшення економічних, енергетичних та екологічних витрат. При спіканні діелектричних матеріалів як основи технічної кераміки перспективно використовувати енергію мікрохвильового поля. Високі швидкості нагрівання зумовлюють не тільки суттєву економію енергії та скорочення часу процесів, але й дозволяють отримувати вироби з дрібнодисперсною та бездефектною мікроструктурою та покращеними функціональними властивостями. Стверджується, що швидкість нагрівання мікрохвильовим випромінюванням може бути істотно вищою порівняно з нагріванням у традиційних печах. Визначення швидкості нагрівання та температури при надшвидкому високотемпературному спіканні (UHS) є актуальним завданням, вирішенню якого сприяють надійні математичні моделі. Наголошується на необхідності визначення коректних математичних моделей теплопровідності для умов високоінтенсивного нагрівання матеріалу. Проведено аналіз рівнянь теплопровідності параболічного та гіперболічного типу, встановлено, що в умовах мікрохвильового спікання діелектричних матеріалів немає необхідності враховувати кінцевість швидкості поширення теплоти, оскільки швидкість нагрівання менша за граничну швидкість. Показано, що при часі, що значно перевищує час релаксації, рішення не відрізняється від класичного складеного на основі параболічного рівняння теплопровідності. Наведено результати варіаційних розрахунків нагріву щільного шару порошку карбиду кремнію в мікрохвильовому полі. Проведено аналіз впливу тривалості нагріву, коефіцієнта тепловіддачі, питомої потужності внутрішніх джерел теплоти та товщини шару на температуру матеріалу.

Ключові слова: Мікрохвильова енергія; Математичні моделі; Теплопровідність; Температура; Глибина проникнення; Швидкість нагрівання

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2809>

© The Author(s) 2023. 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

Останнє десятиліття представляло один з періодів інноваційних досліджень у галузі спікання з моменту його відкриття. Визначені два головних напрямки: перший базується на розриву зв'язка між зовнішнім нагріванням і ущільненням, вико-

ристовуючи воду як фактор, що посилює консолідацію (техніки гідроконсолідації). Другий заснований на отриманні нових властивостей за допомогою електромагнітних полів, зокрема мікрохвильового поля, під час спікання (флеш-спікання та іскрове плазмове спікання). Це перспективні способи спікання для зменшення економічних, енер-

гетичних і екологічних витрат, пов'язаних із випалюванням. Основні переваги використання мікрохвильової енергії в термічно активованих процесах випливають із специфіки поглинання мікрохвильової енергії. На відміну від усіх інших широко використовуваних методів, мікрохвилі дозволяють об'ємне нагрівання матеріалів. Мікрохвильова енергія перетворюється на тепло всередині матеріалу, що, як правило, призводить до значної економії енергії та скорочення часу процесу. Цей фактор відіграє вирішальну роль у більшості застосувань, які на сьогодні отримали промислове визнання.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

З початку 21-го століття було вжито кілька зусиль для розробки технологій спікання за допомогою електричного поля та струму [1-5], зокрема мікрохвильове спікання (MWS) [6, 7]. Досліджується новий і дуже перспективний процес спікання під назвою флеш-спікання [9, 10], який був протестований і застосований до кількох керамічних матеріалів [11, 12].

Флеш-спікання (ультрашвидке високотемпературне спікання – UHS) дозволяє швидко ущільнювати нанопорошки з відносно однорідною мікроструктурою. Умови UHS дозволяють надзвичайно прискорити кінетику ущільнення зі значним зниженням температури обробки більш ніж на 200 °C порівняно зі звичайним нагріванням (незалежно від наявності електричного поля). Досвід використання флеш-спікання легованого діоксиду цирконію, який знаходить застосування як структурний матеріал в різних електрохімічних пристроях; довів про ефективність методу. Встановлено, що консолідація стабілізованого ZrO_2 (3YSZ) 3% мол Y_2O_3 шляхом швидкого спікання призвела до незвичайних властивостей, таких як вища твердість і тонші електрохімічні межі зерен [13]. UHS використовується для максимального ущільнення 3 мол % стабілізованого діоксиду цирконію та підвищення енергоефективності процесу. Надвисока швидкість нагрівання, що наближалася до $\approx 2000^\circ C/хв$, створювала щільні і дрібнозернисті (178 ± 18 нм) мікроструктури протягом 60 с [14].

Результати [6] показали ефективність високоінтенсивної мікрохвильової обробки оолітової залізної руди з високим вмістом фосфору, що призвело до покращеного виділення залізної руди та знач-

ного зниження енергії подрібнення. Нагрів у мікрохвильовому полі для високотемпературної обробки матеріалів довів свою ефективність у різних галузях техніки [15]. Ефективність високотемпературної мікрохвильової обробки продемонстрована в таких областях, як спікання та з'єднання керамічних матеріалів [16], створення композиційних [17] та функціонально-градієнтних матеріалів [18], порошкова металургія [19], відпал імплантованих напівпровідникових структур [20].

Високі швидкості нагріву зумовлюють не тільки суттєву економію енергії та скорочення часу процесів, але, що важливіше при створенні високоякісних матеріалів, дозволяють отримувати вироби з дрібнодисперсною та бездефектною мікроструктурою та, як наслідок, покращеними функціональними властивостями [21]. Потужність мікрохвильового джерела може практично повністю використовуватися на нагрівання тільки виробу, що обробляється, без необхідності нагрівати масивні конструкції традиційних печей. Швидкість нагрівання мікрохвильовим випромінюванням може бути суттєво вищою, і це є одним з найбільш важливих факторів у багатьох технологічних процесах [22].

Аналіз літературних даних дозволяє зробити наступні висновки:

- високоінтенсивне спікання на даний час активно впроваджується в виробництво завдяки технологічності, енергоефективності та можливості покращення якості кінцевого продукту;
- при спіканні матеріалів з діелектричними властивостями доцільним є використання енергії мікрохвильового поля;
- визначення швидкості нагрівання та температури матеріалу при надшвидкому високотемпературному спіканні (UHS) є актуальним завданням [23].

3. Мета та завдання досліджень

Метою роботи є обґрунтування використання мікрохвильового поля для високоінтенсивної термообробки матеріалів та встановлення можливості використання математичних моделей теплопровідності параболічного типу для аналітичних розрахунків температурного поля в щільному шарі діелектричних матеріалів, які використовуються при виробництві технічної кераміки, при мікрохвильовому нагріванні.

Для досягнення цієї мети слід вирішити ряд завдань:

- дослідити сучасні методи високоінтенсивної

термообробки матеріалів;

- проаналізувати досвід використання енергії мікрохвильового поля при спіканні діелектричних матеріалів;

- провести аналіз існуючих моделей, складених на основі гіперболічного та параболічного рівняння теплопровідності, та оцінити їх застосовність для розрахунку високоінтенсивних процесів виробництва, зокрема, кераміки;

- вивчити вплив коефіцієнта тепловіддачі, питомої потужності мікрохвильового поля, товщини шару та тривалості мікрохвильового нагріву на розподіл температур у шарі діелектричного матеріалу на прикладі карбіду кремнію.

4. Особливості математичного моделювання високоінтенсивних процесів теплоти

В даний час існує проблема, пов'язана з невизначеністю підходів до моделювання високоінтенсивних процесів, у першу чергу, внаслідок невизначеності припущень, що приймаються при формулюванні диференціального рівняння теплопровідності. Саме поняття високоінтенсивного нагріву застосовується досить широко, при побудові моделей допустимі рівняння як гіперболічного, так і параболічного типу в залежності від специфіки поширення теплоти у конкретному матеріалі. Таким чином, актуальність теми дослідження визначається необхідністю визначення коректних математичних моделей теплопровідності для умов високоінтенсивного нагрівання матеріалу. Аналітичні рішення дають можливість проводити обчислювальні експерименти та в результаті отримувати нові знання про вплив широкого спектра параметрів процесу на тепловий стан тіла.

Моделювання високоінтенсивних процесів поширення теплоти, за яких можливе порушення лінійного зв'язку між тепловим потоком і градієнтом температур, становить особливу складність [24, 25]. Зазвичай при вирішенні задач теплопровідності використовується диференціальне рівняння, в якому зміна температури за часом та координатою описується рівнянням параболічного вигляду, проте при описі високоінтенсивних процесів його застосування може призводити до отримання неправильних результатів.

В [26] отримано рішення нелінійного рівняння теплопровідності, засноване на релаксаційній моделі перенесення теплоти, для квазістаціонарного режиму нагріву, що дозволило отримати залеж-

ність для максимальної швидкості нагріву, вище якої необхідно враховувати кінцевість швидкості розповсюдження тепла:

$$\left. \frac{dT}{d\tau} \right|_{\max} = \frac{V_r^2}{a_r - \tau_r V_r^2} (T_w - T_0) \quad (1)$$

де V_r – лінійна швидкість руху поверхні (ізотерми), a_r – коефіцієнт температуропровідності, T_w , T_0 – температура поверхні (ізотерми) та навколишнього середовища, відповідно.

Для оцінки граничної швидкості нагрівання матеріалу за умови $\tau_r V_w^2 \leq 0,1 a_r$, запропонована наступна залежність [26]:

$$\left. \frac{dT}{d\tau} \right|_{\max} = \frac{T_w - T_0}{9 \tau_r} \quad (2)$$

Час релаксації τ_r оцінювався різними авторами для різних типів матеріалів і було знайдено, що його значення лежить у межах від 10^{-9} с для газів до 10^{-14} с для металів. Швидкість нагріву вище 100 К/с називається високою. Аналіз необхідності застосування гіперболічного рівняння теплопровідності проводився виходячи з розрахункових даних за температурами при завданні екстремально високих значень температур поверхні нагріву: від 3000 до 4000 °С (наприклад, при спіканні кераміки температура не перевищує 1420 °С). Отримано, що швидкість нагрівання в цих умовах складає 1,7...3,8 К/с. Таким чином, при моделюванні температурного поля в процесах спікання кераміки існує можливість застосування рівнянь теплопровідності параболічного типу. Це підтверджується даними [27]: при часі, що значно перевищує час релаксації, рішення не відрізняється від класичного, тобто складеного на основі параболічного рівняння теплопровідності.

5. Математична модель нестационарної теплопровідності на основі параболічного рівняння із внутрішніми джерелами теплоти

При формулюванні математичної моделі в диференційному вигляді приймалися такі умови. Шар матеріалу розглядається як напівобмежений масив із тепловою ізоляцією бічної поверхні при початковій температурі t_0 . В масиві діє позитивне джерело тепла, зумовлене дією мікрохвильового поля, питома потужність якого q_w , Вт/м³. Теплообмін із довкіллям протікає за законом Ньютона-

Рихмана (гранична умова третього роду). Рішення математичної моделі дозволяє отримати значення температури матеріалу по глибині масиву в довільний час. Математична модель в диференційному вигляді:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} \quad (3)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\alpha(t(0, \tau) - t_a) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} \quad (5)$$

де t – температура, x – поточна координата, τ – час, a , λ , c , ρ – відповідно коефіцієнти теплопровідності та теплоємності та густину шару матеріалу; α – коефіцієнт тепловіддачі, q_v – позитивне джерело теплоти.

Рівняння (3) є рівнянням теплопровідності параболічного типу з урахуванням внутрішніх джерел теплоти (мікрохвильове поле), рівняння (4), (5) – початкові та граничні умови.

Прийнято, що джерела тепла є експоненційною функцією координати: позитивний $q_v = q_{v0} \cdot e^{-\gamma x}$. Тут q_{v0} – максимальна питома потужність позитивного джерела, Вт/м³, $e^{-\gamma x}$ – коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії в шарі, м⁻¹; Отримана залежність [28] дозволяє розрахувати температуру напівнескінченного масиву за різних геометричних та фізичних умов середовища та матеріалу.

6. Результати аналітичного дослідження нагрівання щільного шару карбіду кремнію

Аналітичне дослідження температурного поля щільного шару порошку карбіду кремнію проводилося при варіюванні наступних визначальних характеристик: коефіцієнта тепловіддачі α , товщини шару x , питомої потужності внутрішніх джерел теплоти q_v .

Для проведення розрахунків було прийнято такі вихідні дані: $q_{v0} = 3 \cdot 10^5$ Вт/м³, $t_0 = 20$ °С, $t_a = 20$ °С, $a = 8,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\varepsilon' = 30$, $\tan \delta = 0,36$.

Коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії у шарі γ визначається наступною залежністю [29]: $\Delta = 0,0062$ м.

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{0,5} = 81 \text{ м}^{-1}$$

Для отриманого значення коефіцієнта ослаблення електромагнітної енергії у шарі глибина проникнення $\Delta = 0,0062$ м.

Досліджено зміну температури в часі та за глибиною матеріалу (рисунок).

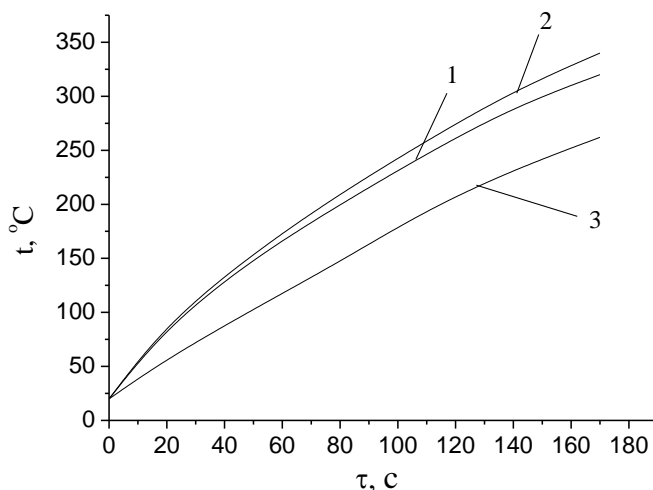


Рисунок – Температура щільного шару карбіду кремнію при мікрохвильовому нагріванні в залежності від часу на різному відстані від поверхні:
1 – $x = 0,001$ м; 2 – $x = 0,01$ м; 3 – $x = 0,05$ м

Видно, що температура у приповерхневому шарі $x = 0,001$ м (крива 1) дещо нижче, ніж на відстані $x = 0,01$ м (крива 2). Це пояснюється впливом охолодження поверхні матеріалу внаслідок теплообміну з довкіллям. Температура матеріалу на відстані від поверхні $x = 0,05$ м (крива 3) помітно нижче температур вищерозташованих шарів. Це пояснюється ослабленням електромагнітної енергії за глибиною. Так, глибина $x = 0,05$ м у 8 разів перевищує глибину проникнення.

Досліджено вплив коефіцієнта тепловіддачі на розподіл температури у матеріалі в діапазоні $\alpha = 10 \dots 40$ Вт/(м²К). Коефіцієнт тепловіддачі істотно впливає на температуру приповерхневого шару. При $x = 0,001$ при $\alpha = 10$ Вт/(м²К) і $\tau = 100$ с температура поверхні становила $t = 226$ °С; при $\alpha = 40$ Вт/(м²К) $t = 217$ °С. При $x = 0,01$ м, $\tau = 100$ с, для $\alpha = 10$ Вт/(м²К) температура становила 231 °С, а при $\alpha = 40$ Вт/(м²К) – 223 °С.

Досліджено вплив питомої потужності внутрішніх джерел теплоти q_v на температуру матеріалу. Отримано, що збільшення q_v у три рази, від $2 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$, призвело до збільшення температури (для контрольного інтервалу часу $\tau = 100$ с) у 2,4 рази. Аналіз результатів розрахунків дозволяє зробити висновок, що аналітична залежність може бути за-

стосована для розрахунку температурного поля діелектричного матеріалу, зокрема для виробництва технічної кераміки, при дії позитивних внутрішніх джерел теплоти, які виникають при взаємодії з мікрохвильовим полем.

7. Висновки

Для здійснення високоінтенсивних процесів спікання технічної кераміки доцільно використувати енергію мікрохвильового поля.

Встановлено, що при моделюванні температурного поля у процесах спікання кераміки існує принципова можливість застосування рівнянь теплопровідності параболічного типу та математичних моделей на його основі. Швидкість нагрівання становить 1,7...8 К/с.

Варіаційні розрахунки процесу нагрівання щільного шару порошку карбиду кремнію в мікрохвильовому полі показали, що математична модель адекватно описує фізичні явища, що виникають при нагріванні діелектричних матеріалів з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем. Збільшення потужності внутрішніх джерел теплоти q_v призводить до підвищення температури матеріалу. Збільшення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні шару в навколишнє середовище призводить до зниження температури матеріалу.

Внаслідок впливу теплообміну діелектричного матеріалу з навколишнім середовищем в умовах мікрохвильового нагріву температура поверхні нижче, ніж температура приповерхневих шарів. При товщині шару, що наближається до глибини проникнення, температура монотонно знижується, що пояснюється ослабленням мікрохвильової енергії.

Особистий внесок авторів CRediТ

Потапов В.О.: концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Волгушева Н.В.:** комп'ютерне моделювання, методичне забезпечення. **Бошков Л.З.:** аналіз та узагальнення даних. **Кравченко Є.О.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків. **Єрохін Д.М.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків

Література

1. **Martin Bram et al.** Application of Electric Current-Assisted Sintering Techniques for the

Processing of Advanced Materials // *Advanced Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 22, No. 6. – P. 2000051. DOI: doi.org/10.1002/adem.202000051.

2. **Rachman Chaim et al.** Grain growth during spark plasma and flash sintering of ceramic nanoparticles: a review // *Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 53, No. 5. – P. 3087–3105. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-017-1761-7

3. **Kiran S. Naik, Vincenzo M. Sglavo, Rishi Raj.** Field assisted sintering of ceramic constituted by alumina and yttria stabilized zirconia // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – Vol. 34, No. 10. – P. 2435–2442. DOI: doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.02.042.

4. **Reginaldo Muccillo, Michel Kleitz, Eliana N. S. Muccillo.** Flash grain welding in yttria stabilized zirconia // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2011. – Vol. 31, No. 8. – P. 1517-1521. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.02.030.

5. **Olevsky, E. A., & Dudina, D. V.** (2018). Field-Assisted Sintering. – Springer International Publishing: Nature, 2018. – 425 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76032-2.

6. **Mamdouh Omran et al.** Microwave Assisted Liberation of High Phosphorus Oolitic Iron Ore // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. – 2014. – Vol. 02, No. 05. – P. 414-427. DOI: doi.org/10.4236/jmmce.2014.25046.

7. **Kirill I. Rybakov, Eugene A. Olevsky, Ekaterina V. Krikun.** Microwave Sintering: Fundamentals and Modeling // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 96, No. 4. – P. 1003-1020. DOI: https://doi.org/10.1111/jace.12278.

8. **Marco Cologna, Boriana Rashkova, Rishi Raj.** Flash Sintering of Nanograin Zirconia in <5 s at 850°C // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2010. – Vol. 93, No. 11. – P. 3556-3559. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04089.x.

9. **Jieming Liu et al.** Flash Sintering of 8YSZ Ceramics under AC Fiel // 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). – Richland, WA, USA, 20-23 October 2019. – P. 1. DOI: doi.org/10.1109/ceidp47102.2019.9009617.

10. **Tarini Prasad Mishra et al.** Ultra-fast high-temperature sintering of strontium titanate // *Acta Materialia*. – 2022. – Vol. 231. – P. 117918. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117918.

11. **Mattia Biesuz, Salvatore Grasso, Vincenzo M. Sglavo.** What's new in ceramics sintering? A short report on the latest trends and future prospects // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*.

- 2020. – Vol. 24, no. 5. – P. 100868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100868>.
12. **Mattia Biesuz, Vincenzo M. Sglavo.** Flash sintering of ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2019. – Vol. 39, No. 2-3. – P. 115-143. DOI: doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.08.048.
13. **Mattia Biesuz et al.** Ultrafast high-temperature sintering (UHS) vs. Conventional sintering of 3YSZ: microstructure and properties // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.01.064>.
14. **Jian Dong et al.** Thermally-insulated ultra-fast high temperature sintering (UHS) of zirconia: A master sintering curve analysis // *Scripta Materialia*. – 2021. – Vol. 203. – P. 114076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114076>.
15. **Kazi E. Haque.** Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review // *International Journal of Mineral Processing*. – 1999. – Vol. 57, No. 1. – P. 1–24. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(99\)00009-5](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(99)00009-5).
16. **S. Aravindan, R. Krishnamurthy.** Joining of ceramic composites by microwave heating // *Materials Letters*. – 1999. – Vol. 38, No. 4. – P. 245-249. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(98\)00166-9](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(98)00166-9).
17. **Tejas Pramod Naik, Inderdeep Singh, Apurbba Kumar Sharma.** Processing of polymer matrix composites using microwave energy: A review // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2022. – Vol. 156. – P. 106870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106870>.
18. **Charu Lata Dube et al.** Microwave synthesis and mechanical characterization of functionally graded material for applications in fusion devices // *Bulletin of Materials Science*. – 2014. – Vol. 37, No. 7. – P. 1607-1611. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-014-0724-8>.
19. **Charles Manière et al.** Microwave flash sintering of metal powders: From experimental evidence to multiphysics simulation // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.017>.
20. **Yu V. Bykov et al.** Diffusion Processes in Semiconductor Structures During Microwave Annealing // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2003. – Vol. 46, No. 8/9. – P. 749-755. DOI: <https://doi.org/10.1023/b:raqe.0000025008.97954.1c>.
21. **Avijit Mondal, Anish Upadhyaya, Dinesh Agrawal.** Effect of heating mode and sintering temperature on the consolidation of 90W–7Ni–3Fe alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2011. – Vol. 509, No. 2. – P. 301-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.008>.
22. **Junhui Yao et al.** Effect of microwave treatment on thermal properties and structural degradation of red sandstone in rock excavation // *Minerals Engineering*. – 2021. – Vol. 162. – P. 106730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106730>.
23. **Mattia Biesuz et al.** On the temperature measurement during ultrafast high-temperature sintering (UHS): Shall we trust metal-shielded thermocouples? // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.061.
24. **J. Ordóñez-Miranda, J. J. Alvarado-Gil.** Determination of thermal properties for hyperbolic heat transport using a frequency-modulated excitation source // *International Journal of Engineering Science*. – 2012. – Vol. 50, No. 1. – P. 101-112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2011.08.012>.
25. **Zhendong Luo, Shiju Jin, Jing Chen.** A reduced-order extrapolation central difference scheme based on POD for two-dimensional fourth-order hyperbolic equations // *Applied Mathematics and Computation*. – 2016. – Vol. 289. – P. 396-408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.05.032>.
26. **Ісаєв К. Б.** Вплив різних факторів на температурне поле при квазістаціонарному режимі нагрівання матеріалів // *Промислова теплотехніка*. – 1987. – Т. 9, № 3. – С.39-43.
27. **Mikhail B. Babenkov, Elena A. Ivanova.** Analysis of the wave propagation processes in heat transfer problems of the hyperbolic type // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2013. – Vol. 26, No. 4. – P. 483-502. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00161-013-0315-8>.
28. **Колесниченко Н.А.** Особливості поширення теплоти в дисперсних і щільних середовищах при високоінтенсивних процесах нагріву // Автореферат дис. на здобуття наук. ступ. к.т.н. за спец. 05.14.06 – "Технічна теплофізика й промислова теплоенергетика". – Одеса: Одеська національна академія харчових технологій, 2017. – 22 с.
29. **Xiusheng Harrison Yang, Juming Tang.** *Advances In Bioprocessing Engineering. Advances in Agricultural Science & Technology: Volume 1* – World scientific, 2002. – 184 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/4763>.

Research of high-intensive heating during the sintering of technical ceramics

Volodymyr Potapov¹✉, Natalya Volgusheva², Leonid Boshkov³, Yevhen Kravchenko⁴, Dmytro Yerokhin⁵

¹State Biotechnology University, 44, Alchevskikh Str., Kharkiv, 61000, Ukraine;

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

✉ e-mail: ¹potapov@bigmir.net

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0731-2598>, ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>, ³<http://orcid.org/0000-0002-2196-1519>, ⁴<https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>, ⁵<https://orcid.org/0009-0001-7302-8245>

The analysis of the results of global research on advanced methods of heat treatment of materials in various technical fields is given. High-intensity sintering has been found to have a number of advantages, such as reduced economic, energy and environmental costs. When sintering dielectric materials as the basis of technical ceramics, it is promising to use the energy of the microwave field. High heating rates lead not only to significant energy savings and reduction of process time, but also allow to obtain products with finely dispersed and defect-free microstructure and improved functional properties. It is claimed that the rate of heating by microwave radiation can be significantly higher compared to heating in traditional ovens. Determination of the heating rate and temperature during ultrafast high-temperature sintering (UHS) is an urgent task, the solution of which is facilitated by reliable mathematical models. The need to define correct mathematical models of thermal conductivity for conditions of high-intensity heating of the material is emphasized. An analysis of parabolic and hyperbolic heat conduction equations was carried out, and it was established that under the conditions of microwave sintering of dielectric materials, there is no need to take into account the end of the heat propagation speed, since the heating speed is lower than the limiting speed. It is shown that for a time significantly longer than the relaxation time, the solution does not differ from the classical heat conduction equation based on the parabolic equation. The results of variational calculations of the heating of a dense layer of silicon carbide powder in a microwave field are presented. An analysis of the influence of heating duration, heat transfer coefficient, specific power of internal heat sources, and layer thickness on the temperature of the material was carried out.

Keywords: Microwave energy; Mathematical models; Thermal conductivity; Temperature; Penetration depth; Heating rate

References

1. **Bram, M., Laptev, A. M., Mishra et al.** (2020). Application of Electric Current-Assisted Sintering Techniques for the Processing of Advanced Materials. *Advanced Engineering Materials*, 22(6), 2000051.
2. **Chaim, R., Chevallier, G., Weibel, A., & Estournès, C.** (2017). Grain growth during spark plasma and flash sintering of ceramic nanoparticles: a review. *Journal of Materials Science*, 53(5), 3087-3105.
3. **Naik, K. S., Sglavo, V. M., & Raj, R.** (2014). Field assisted sintering of ceramic constituted by alumina and yttria stabilized zirconia. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(10), 2435-2442.
4. **Muccillo, R., Kleitz, M., & Muccillo, E. N. S.** (2011). Flash grain welding in yttria stabilized zirconia. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(8), 1517-1521.
5. **Olevsky, E. A., & Dudina, D. V.** (2018). Field-Assisted Sintering. *Springer International Publishing: Naure*, 425.
6. **Omran, M., Fabritius, T., Abdel-Khalek, N., El-Aref, M., Elmanawi, A. E.-H., Nasr, M., & Elmahdy, A.** (2014). Microwave Assisted Liberation of High Phosphorus Oolitic Iron Ore. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 02(05), 414-427.
7. **Rybakov, K. I., Olevsky, E. A., & Krikun, E. V.** (2013). Microwave Sintering: Fundamentals and Modeling. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(4), 1003-1020.
8. **Cologna, M., Rashkova, B., & Raj, R.** (2010). Flash Sintering of Nanograin Zirconia in <5 s at 850°C. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(11), 3556-3559.

9. Liu, J., Zhu, Y., Wang, X., Jia, Z., & Wang, L. (2019). Flash Sintering of 8YSZ Ceramics under AC Fiel. *2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. IEEE.
10. Mishra, T. P., Wang, S., Lenser, C. et al. (2022). Ultra-fast high-temperature sintering of strontium titanate. *Acta Materialia*, 231, 117918.
11. Biesuz, M., Grasso, S., & Sglavo, V. M. (2020). What's new in ceramics sintering? A short report on the latest trends and future prospects. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 24(5), 100868.
12. Biesuz, M., & Sglavo, V. M. (2019). Flash sintering of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(2-3), 115-143.
13. Biesuz, M., Beauvoir, T. H. d., De Bona, E., Cassetta, M., Manière, C., Sglavo, V. M., & Estournès, C. (2024). Ultrafast high-temperature sintering (UHS) vs. Conventional sintering of 3YSZ: microstructure and properties. *Journal of the European Ceramic Society*.
14. Dong, J., Pouchly, V., Biesuz, M., Tyrpekl, V., Vilémová, M., Kermani, M., Reece, M., Hu, C., & Grasso, S. (2021). Thermally-insulated ultra-fast high temperature sintering (UHS) of zirconia: A master sintering curve analysis. *Scripta Materialia*, 203, 114076.
15. Haque, K. E. (1999). Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International Journal of Mineral Processing*, 57(1), 1-24.
16. Aravindan, S., & Krishnamurthy, R. (1999). Joining of ceramic composites by microwave heating. *Materials Letters*, 38(4), 245-249.
17. Naik, T. P., Singh, I., & Sharma, A. K. (2022). Processing of polymer matrix composites using microwave energy: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 156, 106870.
18. Dube, C. L., Patil, Y., Kanpara, S., Khirwadkar, S. S., & Kashyap, S. C. (2014). Microwave synthesis and mechanical characterization of functionally graded material for applications in fusion devices. *Bulletin of Materials Science*, 37(7), 1607-1611.
19. Manière, C., Lee, G., Zahrah, T., & Olevsky, E. A. (2018). Microwave flash sintering of metal powders: From experimental evidence to multiphysics simulation. *Acta Materialia*, 147, 24-34.
20. Bykov, Y. V., Ereemeev, A. G., Zharova, N. A., Plotnikov, I. V., Rybakov, K. I., Drozdov, M. N., Drozdov, Y. N., & Skupov, V. D. (2003). Diffusion Processes in Semiconductor Structures During Micro wave Annealing. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 46(8/9), 749-755.
21. Mondal, A., Upadhyaya, A., & Agrawal, D. (2011). Effect of heating mode and sintering temperature on the consolidation of 90W-7Ni-3Fe alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(2), 301-310.
22. Yao, J., Tao, M., Zhao, R., Hashemi, S. S., & Wang, Y. (2021). Effect of microwave treatment on thermal properties and structural degradation of red sandstone in rock excavation. *Minerals Engineering*, 162, 106730.
23. Biesuz, M., Karacasulu, L., Vakifahmetoglu, C., & Sglavo, V. M. (2023). On the temperature measurement during ultrafast high-temperature sintering (UHS): Shall we trust metal-shielded thermocouples? *Journal of the European Ceramic Society*.
24. Ordóñez-Miranda, J., & Alvarado-Gil, J. J. (2012). Determination of thermal properties for hyperbolic heat transport using a frequency-modulated excitation source. *International Journal of Engineering Science*, 50(1), 101-112.
25. Luo, Z., Jin, S., & Chen, J. (2016). A reduced-order extrapolation central difference scheme based on POD for two-dimensional fourth-order hyperbolic equations. *Applied Mathematics and Computation*, 289, 396-408.
26. Isaev K. B. (1987). Influence of various factors on the temperature field in the quasi-stationary mode of heating materials *Industrial thermotechnics* 9 (3), 39-43.
27. Babenkov, M. B., & Ivanova, E. A. (2013). Analysis of the wave propagation processes in heat transfer problems of the hyperbolic type. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 26(4), 483-502.
28. N.A. Kolesnychenko (2017). Features of heat passage in disperse and dense environment under high-intensive heating processes. *Abstract of the dissertation. for the acquisition of sciences. stup. Ph.D. for special 05.14.06 "Technical thermal physics and industrial thermal energy". Odesa: Odesa National Academy of Food Technologies*, 22.
29. Yang, X. H., & Tang, J. (2002). Advances In Bioprocessing Engineering. *Advances in Agricultural Science & Technology: Volume 1*. World Scientific, 184.