

УДК 621.315.61:621.78:537.86  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/24>

**Тортіка Д.М.**

<https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>

Одеський національний технологічний університет

## ТЕРМООБРОБКА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВАННЯ

Розглядається сучасний стан та перспективи використання мікрохвильового нагрівання для термообробки діелектричних матеріалів в процесі виготовлення функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ). Мікрохвильова обробка стає важливим інструментом у сучасних технологіях виготовлення матеріалів завдяки низці ключових переваг: швидке та рівномірне об'ємне нагрівання, висока селективність впливу на матеріали з різною діелектричною проникністю, суттєва енергоефективність та екологічність процесу. В статті відзначено, що мікрохвильове нагрівання дозволяє суттєво зменшити час спікання та енергоспоживання порівняно з традиційними тепловими методами. Зокрема, наведено результати актуальних досліджень, які демонструють успішне застосування мікрохвильового спікання для створення функціонально-градієнтних матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками: збільшення інтенсивності спікання керамічних підложок у 4 рази, зниження енергоспоживання до 37%, формування багатошарових градієнтних структур  $Ti_2AlC_{0.5}N_{0.5}$  із рекордним поглинанням електромагнітних хвиль (83,4 дБ) та створення алмазовмісних композитів  $W-Cu$  із підвищеною теплопровідністю. Разом з перевагами в статті висвітлено проблемні аспекти мікрохвильового нагрівання, що стримують його широке промислове впровадження. Серед основних проблем – нерівномірність нагріву, відома як ефект теплового розгону, що викликаний локальним перегрівом унаслідок неоднорідності матеріалів та температурної залежності поглинання електромагнітних хвиль. Також наголошується на жорсткій залежності від діелектричних властивостей матеріалів, що обмежує застосовність методу для певних сполук, а також на складнощях з масштабуванням технології при переході від лабораторних зразків до великомасштабного виробництва. Окрему увагу приділено перспективним технологічним підходам, зокрема гібридному нагріванню та методу температурного градієнта, які дозволяють ефективно розв'язати проблему теплового розгону.

**Ключові слова:** мікрохвильове нагрівання, функціонально-градієнтні матеріали, термообробка, кераміка, діелектричні матеріали, матеріалознавство.

**Постановка проблеми.** При виготовленні сучасної техніки виникають жорсткі вимоги до матеріалів, матеріали повинні бути одночасно твердими та гнучкими, стійкими до нагрівання та мати невелику вагу. Традиційні матеріали, що складаються з однорідних шарів часто не здатні витримати задані вимоги. Розв'язання цієї проблеми знайшли вчені ще в 1980-х роках, розробивши функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) в статтях Рабіна [1], Салеха [2], Удупи [3], Мохаммаді [4].

Функціонально-градієнтні матеріали, це матеріали в яких мікроструктури змінюються плавно по всьому виробу, що дає можливість поєднувати в собі властивості різних матеріалів, наприклад кераміки та діелектричних матеріалів.

Одним із перспективних методів виготовлення ФГМ є використання мікрохвильового нагрівання. При мікрохвильовому спіканні частинки матеріалів з'єднуються набагато швидше в порівнянні зі звичайними методами, описано в роботах Чандрасекарана [5], Леонеллі [6], Тостенсона [7]. Застосування мікрохвильового нагрівання створює умови для формування якісної градієнтної структури з мінімальними залишковими напруженнями, що значно підвищує експлуатаційні характеристики матеріалів Данца [8].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В основі досліджень ФГМ стоїть принцип з'єднання різнорідних матеріалів способом, що використовує переваги кожного матеріалу. Через



відмінність коефіцієнтів теплового розширення залишкові термічні напруги в металокерамічних ФГМ часто неприпустимо великі. Основні переваги та обмеження використання мікрохвильового нагрівання при виготовленні ФГМ наведено в табл. 1.

Часто наведені проблеми пов'язані між собою та можуть мати спільні рішення за допомогою нових методів, удосконалення обладнання та дослідженням нових сполук матеріалів.

Згідно з статтею Даса [9] мікрохвильова обробка пропонує значні переваги в скороченні часу виробництва, економії енергії, підвищенні якості та нових можливостях у матеріалознавстві, однак для широкого комерційного впровадження потрібні додаткові фундаментальні дослідження і подолання технічних перешкод.

Ефективність використання мікрохвильового поля на практиці, в порівнянні з традиційним конвективним способом, показано в роботі Потапова та ін. [10]. На прикладі керамічної підложки з порошку карбиду кремнію товщиною приблизно 3 мм та розміром 165x165 мм було показано, що мікрохвильове спікання дозволяє збільшити інтенсивність процесу спікання у 4 рази та знизити енергоспоживання на 37% порівняно з традиційним способом.

З недавніх досліджень успішне виготовлення ФГМ за використання мікрохвильового нагрівання наведено в роботі Се [11]. Головним досягненням є 10-хвилинний синтез багаточислової градієнтної структури на основі  $Ti_2AlC_{0.5}N_{0.5}$  з високим поглинанням електромагнітних хвиль та ефективним тепловим екрануванням. В основі методу лежить оригінальна стратегія «мікрохвильового сольового синтезу з контрольованою дифузією вуглецю». Отриманий матеріал має

складну градієнтну будову: ядро з аморфізованого вуглецевого волокна, проміжний шар  $TiCo_{0.5}N_{0.5}$  та зовнішню оболонку з  $Ti_2AlC_{0.5}N_{0.5}$ . Така архітектура забезпечує виняткові функціональні властивості, що забезпечила рекордне поглинання електромагнітних хвиль (83,4 дБ) та ефективне теплове екранування при 600 °С. Дана методика дозволила розв'язувати проблему «теплового розгону». Дослідники свідомо створили зворотний температурний градієнт (гаряче волокно в холоднішому розчині) для спрямованої дифузії вуглецю та формування градієнтної структури.

Зокрема, в дослідженні Вея [12], при виготовленні ФГМ на основі алмазу та вольфрамо-мідної суміші, дослідники знайшли рішення таких проблем, як: недостатня теплопровідність традиційних W/Cu та графітизація алмазу при високих температурах, опираючись на збереження та покращення властивостей матеріалів на кожному етапі виготовлення. Для підвищення теплопровідності структури W/Cu автори додали алмазні частинки, які мають надзвичайно високу теплопровідність (~2200 Вт/(м·К)) і низький коефіцієнт теплового розширення, що покращило теплотехнічні властивості матеріалу. Для запобігання графітизації алмазу використали покриття з вольфраму товщиною близько 200 нм, що покращило сумісність фаз і захист. Мікрохвильове спікання забезпечило швидкий, рівномірний нагрів, який допоміг зберегти градієнтний склад та структуру, запобігти надмірному росту зерен і отримати щільності (до 94.66 %). Інтеграція алмазу у високомідний шар і використання мікрохвильового спікання дозволили отримати композит з покращеною теплопровідністю (220 Вт/(м·К) проти 209 Вт/(м·К) без алмазу) та кращою термічною стійкістю при теплових ударах.

Таблиця 1

**Переваги та обмеження використання мікрохвильового нагрівання при виготовленні ФГМ**

Переваги	Обмеження
Високошвидкісне об'ємне нагрівання	Нерівномірність нагріву (Тепловий розгін). Локальне перегрівання через неоднорідність складу ФГМ та зростання поглинання хвиль із температурою.
Селективність нагріву	Жорстка залежність від діелектричних властивостей. Метод просто "не працює" з матеріалами, які не поглинають мікрохвилі або є небезпечним при високій концентрації металів
Щільна структура зерен	Необхідність складного контролю процесу. Для запобігання тепловому розгону потрібен контроль температури в реальному часі та однорідності поля. Використання простих побутових печей часто є недостатнім і потребує модифікацій
Зниження енергоспоживання	Неконтрольований профіль температур, що ускладнює прогнозування термічних напружень
Екологічність та чистота процесу	Складність масштабування та відтворюваності. При переході від невеликого лабораторного зразка до великої партії виробів або виробів складної форми, картина нагріву може кардинально змінитися.
Компактність та гнучкість обладнання	Обмеження щодо форми та розміру виробів. Глибина проникнення мікрохвиль обмежена і залежить від частоти та властивостей матеріалу.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз останніх досліджень пов'язаних з ефективним виготовленням функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання з виявленням основних невирішених проблем.

**Виклад основного матеріалу. Теоретичні основи мікрохвильового нагрівання діелектриків.** Мікрохвильове нагрівання - це процес перетворення електромагнітної енергії в теплову. Даний спосіб нагрівання дозволяє швидко та рівномірно прогрівати товстостінні вироби по усьому об'ємові виробу з мінімальними внутрішніми напруженнями, особливо в таких матеріалах, як кераміка та полімери. З фізичної точки зору електромагнітна енергія виникає коли електричне поле взаємодіє із зарядженими частинками. Електричне поле викликає в матеріалі різні види поляризації, такі як: електронна, атомна, орієнтаційна (обертання диполів) та міжфазна (ефект Максвелла-Вагнера), описувалося в роботі Анджелі [13], Мередита [14], Ачієрно [15]. Також в деяких випадках нагрівання виникає через магнітне поле, наприклад при використанні деяких водних електролітичних розчинів, магнітних діелектричних матеріалів і певних провідних порошкових матеріалів, продемонстровано в статті Сунь [16], Чена [17], Пена [18].

Виготовленням функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання є відносно новою технологією та немає універсальної методики або інструкції. В свою чергу існують підходи, що базуються на властивостях мікрохвильового нагріву, властивостях матеріалів та утворення градієнтних структур.

Під час мікрохвильового нагрівання увагу необхідно виділяти на те що, мікрохвилі проникають в об'єм матеріалу і генерують тепло безпосередньо всередині матеріалу, поглинання мікрохвильової енергії визначається діелектричними властивостями матеріалу, характер нагріву дуже чутливий до розміру, форми зразка, частоти випромінювання та положення зразка в камері [5], [8].

Проаналізувавши доступну літературу можна виділити декілька основних підходів для виготовлення ФГМ за використання мікрохвильового нагрівання, це гібридне мікрохвильове нагрівання, метод температурного градієнта та імпульсне мікрохвильове нагрівання.

Гібридне мікрохвильове нагрівання використовують в ситуаціях коли матеріали погано поглинають мікрохвилі за кімнатної температури. Зразок оточують «суцептором» (допоміжний нагрівач), який добре поглинає мікрохвилі та швидко нагрі-

вається. Суцептор передає тепло зразка за допомогою теплопровідності та випромінювання на початковому етапі. Коли температура зразка досягає «критичної точки», він сам починає ефективно поглинати мікрохвилі, і далі нагрівається вже об'ємно [19].

Метод температурного градієнта призначений для спікання ФГМ, що складаються з компонентів з дуже різними температурами спікання. При мікрохвильового нагріву у зразку створюють контрольований градієнт температури. Це дозволяє різним частинам зразка з різним хімічним складом досягати своєї оптимальної температури спікання одночасно, мінімізуючи напруження [20].

Імпульсне мікрохвильове нагрівання (як перспективний напрям). При імпульсному нагріванні електромагнітна енергія поглинається безпосередньо в об'ємі матеріалу, а під час пауз тепло перерозподіляється внаслідок теплопровідності [21].

**Технічні аспекти.** Для виготовлення функціонально-градієнтних матеріалів в мікрохвильовому полі використовують мультимодові та моноמודові камери.

У мультимодових камерах мікрохвилі багаторазово відбиваються від стінок, створюючи складну інтерференційну картину (багато "мод" коливань). Це забезпечує в середньому рівномірне нагрівання зразків великого об'єму.

Моноמודові камери створюють стоячу хвилю з чітко визначеним максимумом електричного поля в певній точці. Це дозволяє досягти надзвичайно високої та передбачуваної щільності енергії, що ідеально підходить для дослідження кінетики спікання малих зразків ФГМ або для з'єднання матеріалів.

В мікрохвильовій обробці функціонально-градієнтних матеріалів найпоширенішою є частота 2,45 ГГц, яка використовується в лабораторних і побутових установках завдяки доступності магнетронів і достатній глибині проникнення для більшості діелектричних матеріалів. Для промислових масштабів застосовують нижчі частоти, зокрема 915 МГц (або 896 МГц), які забезпечують значно більшу глибину проникнення електромагнітної хвилі, що критично для рівномірного об'ємного нагрівання великих виробів.

Для контролю температури при мікрохвильовому нагріванні ФГМ використовують три основні типи обладнання. Оптичні пірометри є найпоширенішим вибором, оскільки вони працюють безконтактно, вимірюючи інфрачервоне випромінювання поверхні зразка, що дозволяє уникнути впливу електромагнітного поля на датчик. Термопари викорис-

товуються рідше через ризик нагрівання металевих дротів у полі та спотворення результатів, тому для роботи в мікрохвильових установках застосовують спеціальні екрановані або надтонкі термодари, або ж вимірювання проводять у паузах між імпульсами нагріву. Тепловізори, які дозволяють отримувати повну двовимірну картину розподілу температури на поверхні зразка в реальному часі. Комбінування цих методів дозволяє досягти необхідної точності контролю температурних полів.

Для подолання проблеми теплового розгону та нерівномірності нагріву дедалі частіше застосовують моделювання процесу мікрохвильової обробки ФГМ. Один із методів моделювання мікрохвильової обробки ФГМ є метод скінченних елементів (FEM), що дозволяє враховувати залежність діелектричних і теплофізичних властивостей від температури, координат (для ФГМ) та пористості. У роботі Цуя [22] розроблено використана мультифізична чисельна модель, яка інтегрує розв'язання рівнянь електромагнетизму і теплопереносу задля дослідження поведінки Y-TZP кераміки в мікрохвильовому полі. Ця модель відповідає за прогнозування тривимірного розподілу електромагнітного поля і температури, а також дозволяє аналізувати вплив параметрів системи на ефективність нагріву до проведення експерименту. Для аналізу нелінійної теплопровідності в градієнтних середовищах також використовують безсіткові методи (LBIEM) Сладека [23]. На макрорівнях застосовують метод дискретних елементів для дослідження впливу контактів між частинками на локальне поглинання енергії [23]. Поєднання цих підходів дозволяє не лише оптимізувати режими нагріву, а й передбачити формування градієнтної структури з мінімальними залишковими напруженнями.

Моделювання процесу підтверджує свою ефективність, проте створення адекватних моделей для матеріалів із градієнтними діелектричними властивостями досі залишається складною науково-технічною задачею.

**Практичне застосування отриманих ФГМ.** ФГМ знаходять практичне застосування в бага-

тьох високотехнологічних галузях, де особливу роль грають здатність витримувати термічні й механічні напруження, а також стійкість до впливу агресивних середовищ. ФГМ використовуються в таких сферах, як: аерокосмічна галузь (теплозахисні покриття), біомедицина (імпланти), енергетика та промислове виробництво (зносостійкі інструменти), електроніка (термоелектричні напівпровідники) та інше [24].

**Висновки.** В даній роботі проаналізовано сучасні рішення по виготовленню функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання.

Виявлено основні обмеження, що стримують широке промислове впровадження мікрохвильової обробки ФГМ. До них належать: нерівномірність нагріву (ефект теплового розгону), критична залежність від діелектричних властивостей матеріалів, складність масштабування процесу та необхідність контролю температурних полів у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень, зокрема робіт [10], [11], [12] демонструє успішне застосування мікрохвильового спікання для створення ФГМ із покращеними експлуатаційними характеристиками. Доведено, що використання цього методу дозволяє інтенсифікувати процес виробництва (зменшення часу спікання у 4 рази), знизити енергоспоживання (до 37%) та забезпечити формування унікальних структур.

Виготовленням функціонально-градієнтних матеріалів за використання мікрохвильового нагрівання є перспективним напрямом, як для досліджень, так і промислового виробництва, та потребують подальшого вивчення та розв'язання технічних проблем пов'язаних з переходом до масштабного виробництва.

Моделювання процесу мікрохвильової обробки ФГМ дозволяє спрогнозувати та вирішити проблему теплового розгону та нерівномірності нагріву до проведення експерименту, але створення адекватних моделей для матеріалів із градієнтними структурами досі є складною задачею.

#### Список літератури:

1. Rabin B. H., Shiota I. Functionally Graded Materials. *MRS Bulletin*. 1995. Vol. 20, no. 1. P. 14–18. URL: <https://doi.org/10.1557/s0883769400048855>.
2. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges / B. Saleh et al. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 201. P. 108376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108376>.
3. Udupa G., Rao S. S., Gangadharan K. V. Functionally Graded Composite Materials: An Overview. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 1291–1299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.442>.

4. Mohammadi M., Rajabi M., Ghadiri M. Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*. 2021. Vol. 15, no. 4. P. 319–343. URL: <https://doi.org/10.2298/pac2104319m>.
5. Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak T. Microwave material processing-a review. *AIChE Journal*. 2011. Vol. 58, no. 2. P. 330–363. URL: <https://doi.org/10.1002/aic.12766>.
6. Microwave assisted sintering of green metal parts / C. Leonelli et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 205, no. 1-3. P. 489–496. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.263>.
7. Thostenson E. T., Chou T. W. Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30, no. 9. P. 1055–1071. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00020-2).
8. Dantz D. [. Eigenspannungen in mikrowellengesinterten Ni/8Y-ZrO<sub>2</sub> und NiCr8020/8Y-ZrO<sub>2</sub> Gradientenwerkstoffen / vorgelegt von Dirk Dantz. 2000. URL: <http://d-nb.info/96029242X/34>.
9. Prospects of microwave processing: An overview / S. Das et al. *Bulletin of Materials Science*. 2009. Vol. 32, no. 1. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>.
10. Дослідження високоінтенсивного нагріву при спіканні технічної кераміки / В. О. Потапов та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. Т. 59, № 4. С. 261–268. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2809>.
11. Multilayered gradient Ti<sub>2</sub>AlC<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> prepared by crystal/amorphous C diffusion for efficient electromagnetic absorption and thermal shielding / C. Xie et al. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63975-1>.
12. Fabrication of diamond/W–Cu functionally graded material by microwave sintering / C. Wei et al. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.035>.
13. Angela A., d'Amore M. Relevance of Dielectric Properties in Microwave Assisted Processes. *Microwave Materials Characterization*. 2012. URL: <https://doi.org/10.5772/51098>.
14. Meredith R. J. Engineers' handbook of industrial microwave heating. London : Institution of Electrical Engineers, 1998. 363 p.
15. Acierno D., Barba A. A., d'Amore M. Heat transfer phenomena during processing materials with microwave energy. *Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 40, no. 5. P. 413–420. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-003-0482-4>.
16. Sun J., Wang W., Yue Q. Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies. *Materials*. 2016. Vol. 9, no. 4. P. 231. URL: <https://doi.org/10.3390/ma9040231>.
17. Cheng, J., Roy, R. & Agrawal, D. Experimental proof of major role of magnetic field losses in microwave heating of metal and metallic composites. *Journal of Materials Science Letters* **20**, 1561–1563 (2001). URL: <https://doi.org/10.1023/A:1017900214477>
18. Peng Z., Hwang J.-Y., Andriese M. Magnetic Loss in Microwave Heating. *Applied Physics Express*. 2012. Vol. 5, no. 2. P. 027304. URL: <https://doi.org/10.1143/apex.5.027304>.
19. Processing of Ceramics / ed. by A. Ikesue. Wiley, 2021. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119538806>.
20. Kimura H., Satoh T. Residual Stress Control of Functionally Graded Materials via Pulse-Electric Discharge Consolidation with Temperature Gradient Control. *Functionally Graded Materials* 1996. 1997. P. 355–360. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-044482548-3/50059-7>.
21. Makino Y., Miyake S. Capabilities of Electromagnetic Processing for New Materials Syntheses. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. 2002. Vol. 49, no. 10. P. 871–878. URL: <https://doi.org/10.2497/jjspm.49.871>.
22. Microwave-induced heating behavior of Y-TZP ceramics under multiphysics system / K. Cui et al. *Green Processing and Synthesis*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 119–130. URL: <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0013>.
23. Sladek J., Sladek V., Zhang C. A local BIEM for analysis of transient heat conduction with nonlinear source terms in FGMs. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2004. Vol. 28, no. 1. P. 1–11. URL: [https://doi.org/10.1016/s0955-7997\(03\)00093-6](https://doi.org/10.1016/s0955-7997(03)00093-6).
24. Wetherhold R. C., Seelman S., Wang J. The use of functionally graded materials to eliminate or control thermal deformation. *Composites Science and Technology*. 1996. Vol. 56, no. 9. P. 1099–1104. URL: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00075-9](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00075-9).

#### **Tortika D.M. HEAT TREATMENT OF DIELECTRIC MATERIALS IN THE MANUFACTURE OF FUNCTIONAL GRADIENT MATERIALS USING MICROWAVE HEATING**

*The current state and prospects of using microwave heating for heat treatment of dielectric materials in the process of manufacturing functionally gradient materials (FGM) are considered. Microwave processing is becoming an important tool in modern materials manufacturing technologies due to a number of key*

*advantages: rapid and uniform volumetric heating, high selectivity of the effect on materials with different dielectric permittivities, significant energy efficiency, and environmental friendliness of the process. The article notes that microwave heating allows for a significant reduction in sintering time and energy consumption compared to traditional thermal methods. In particular, the results of recent studies are presented, demonstrating the successful application of microwave sintering to create functionally graded materials with improved performance characteristics: a fourfold increase in the sintering intensity of ceramic substrates, a reduction in energy consumption by up to 37%, formation of multilayer gradient  $Ti_2AlCo_{0.5}Ni_{0.5}$  structures with record electromagnetic wave absorption (83.4 dB), and creation of diamond-containing W–Cu composites with enhanced thermal conductivity. In addition to its advantages, the article highlights the problematic aspects of microwave heating that hinder its widespread industrial adoption. Among the main issues is uneven heating, known as the thermal runaway effect, which is caused by localized overheating due to material heterogeneity and the temperature dependence of electromagnetic wave absorption. It also highlights the strong dependence on the dielectric properties of materials, which limits the method's applicability to certain compounds, as well as the challenges of scaling the technology when transitioning from laboratory samples to large-scale production. Special attention is given to promising technological approaches, in particular hybrid heating and the temperature gradient method, which allow for the effective resolution of the thermal runaway problem.*

**Keywords:** *microwave heating, functionally graded materials, heat treatment, ceramics, dielectric materials, materials science.*

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026