

УДК: 666.651

DOI: 10.20535/iwccmm2026354672

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФАЗОУТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ $ZrO_2-TiO_2$ ДЛЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ КЕРАМІКИ

Логвінков С.М.<sup>1</sup>, Борисенко О.М.<sup>2</sup>, Клочко Н.П.<sup>3</sup>, Кривобок Р.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова», Харків, Україна

<sup>2</sup>Доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>3</sup>Кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>4</sup>Доктор технічних наук, зав, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

e-mail: 1. [Serhii.Lohvinkov@kname.edu.ua](mailto:Serhii.Lohvinkov@kname.edu.ua); 2. [oksana.borysenko@khipi.edu.ua](mailto:oksana.borysenko@khipi.edu.ua); 3. [Natalia.Klochko@khipi.edu.ua](mailto:Natalia.Klochko@khipi.edu.ua); 4. [Ruslan.Krivobok@khipi.edu.ua](mailto:Ruslan.Krivobok@khipi.edu.ua)

**Анотація.** Метою роботи було дослідження особливості фазоутворення матеріалів системи  $ZrO_2 - TiO_2$  залежно від складу та умов термічної обробки, зокрема, при швидкісному випалі до 1300 °С. Встановлено формування метастабільних фаз на основі  $ZrTiO_4$ , які суттєво впливають на електрофізичні властивості матеріалів і визначають їх придатність для використання в мікрохвильових керамічних діелектриках. Показано, що керування складом і режимами синтезу дозволяє цілеспрямовано формувати структуру та властивості матеріалів для застосування у сучасних бездротових технологіях.

**Ключові слова:** мікрохвильові діелектричні матеріали, фазоутворення,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrTiO_4$

Сучасний рівень розвитку промисловості та новітніх технологій зумовлює значне зростання попиту на матеріали системи  $ZrO_2 - TiO_2$ . Це, у свою чергу, потребує не лише розширення номенклатури їх складів, а й глибшого вивчення їх властивостей. Такий інтерес пояснюється не тільки високими показниками термічної стійкості, механічної міцності та хімічної інертності окремих оксидів, а й вираженим синергетичним ефектом їх взаємодії. Саме завдяки цьому ефекту вдається отримати бінарні композиції з унікальним поєднанням експлуатаційних характеристик, які перевищують властивості кожного з компонентів окремо.

Матеріали на основі системи  $ZrO_2 - TiO_2$  мають широкий спектр перспективних напрямів практичного використання [1–3]. Зокрема, вони можуть застосовуватися як дисперсна фаза у композиційних суперсплавах із трансформаційно індукованою пластичністю типу TRIP-steel, де вони сприяють покращенню механічних властивостей і довговічності. Окрім того, ці матеріали знаходять застосування у виробництві спеціальних пігментів, таких як «блакитний рутил», що характеризуються стабільністю кольору та стійкістю до впливу зовнішніх факторів. Не менш важливою є їх роль у створенні мікрохвильових керамічних діелектриків, які використовуються в резонаторах, смугових фільтрах та інших елементах сучасних бездротових систем зв'язку. Саме цей напрям сьогодні є найбільш актуальним, що визначає наукову і практичну значущість досліджень, спрямованих на виявлення механізмів і закономірностей фазоутворення в межах цієї системи.

Встановлено, що відмінності у вихідних складах матеріалів зразків № 1 і № 2, які відповідають стехіометричним співвідношенням  $ZrTiO_4$  та  $ZrTi_2O_6$  відповідно, а також особливості режиму термічної обробки (зокрема швидкісний випал до температури 1300 °С без витримки при максимальній температурі) істотно впливають на формування фазового складу. За таких умов утворюються цільові фази на основі  $ZrTiO_4$ , які зберігаються у метастабільному стані навіть після охолодження до кімнатної температури (приблизно 12 і 17 об'ємних відсотків відповідно). Наявність цих фаз є критично важливою, оскільки саме вони

значною мірою визначають електрофізичні властивості матеріалів, необхідні для ефективної роботи мікрохвильових діелектриків.

Водночас процеси структуро- та фазоутворення в досліджених матеріалах мають складний характер і лише частково відповідають класичним закономірностям перебігу евтектоїдних реакцій. Це пояснюється тим, що синтез і подальше охолодження відбуваються в умовах термодинамічної нерівноваги, що призводить до формування нестійких або метастабільних фазових станів.

Дослідження показали, що утворення твердих розчинів на основі  $ZrO_2$  у складі обох зразків не забезпечує стабілізації тетрагональної модифікації цього оксиду. У результаті при кімнатній температурі спостерігається переважно моноклінна фаза  $ZrO_2$ , що має нижчу симетрію та інші фізичні характеристики.

Окрему увагу приділено аналізу гіпотези щодо утворення тетрагональної фази  $Zr_3TiO_8$ , яка потенційно могла б розширити область твердого розчинення  $TiO_2$  у  $ZrO_2$  до 25 молярних відсотків. Підставою для розгляду цієї гіпотези стало виявлення характерних дифракційних максимумів у зразку № 2 при значеннях  $2\theta \approx 30,60^\circ$ ;  $35,34^\circ$ ;  $50,68^\circ$ . Проте детальніший аналіз показав відсутність достатніх доказів на її користь. Зокрема, ці піки раніше могли бути помилково інтерпретовані як ознака утворення твердого розчину  $(Mg_{0,2}Zr_{0,8})O_{1,8}$ . Насправді ж їх доцільніше віднести до твердих розчинів на основі  $ZrTiO_4$  із підвищеним вмістом  $TiO_2$  порівняно зі стехіометричним складом.

На відміну від цього, у зразках № 1 спостерігається формування фази  $ZrTiO_4$  з незначною деформацією кристалічної ґратки (близько 0,20 %), що свідчить про близькість до стехіометричного складу та відносне збіднення на  $TiO_2$ . Такий результат добре узгоджується з сучасними даними, отриманими на основі аналізу фазових діаграм системи  $ZrO_2 - TiO_2$  [3, 4].

## ВИСНОВОК

Таким чином, встановлені особливості фазоутворення в матеріалах цієї системи відкривають можливості для цілеспрямованого керування їхньою структурою та властивостями. Це, у свою чергу, дозволяє створювати керамічні матеріали з наперед заданими характеристиками, що є особливо важливим для їх використання у високочастотній електроніці та мікрохвильових технологіях.

**Подяка.** Дослідження здійснювалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.06/0063 «Технологія виготовлення термостабільної керамічної основи смугових фільтрів для систем сучасної радіокерованої техніки».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Weigelt, C., Berek H., Aneziris, C.G., Wolf, S., Eckner, R., & Krüger, L. (2015). Effect of minor titanium additions on the phase composition of TRIP steel/magnesia partially stabilised zirconia composite materials, *Ceramics International*, 41, 2328–2335. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.040>
2. Dondi M., Matteucci, F., & Cruciani, G. (2006) Zirconium titanate ceramic pigments: Crystal structure, optical spectroscopy and technological properties. *Journal of Solid State Chemistry*, 179, 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2005.10.032>
3. Saenko, I., Platovskaya, M., Savinykh, G., & Fabrichnaya, O. (2017). Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the  $ZrO_2-TiO_2$  system, *Journal of the American Ceramic Society*, 101 386–399. <https://doi.org/10.1111/jace.15176>
4. Logvinkov, S. M., Borysenko, O. M., Klochko, N. P., Shabanova, H. M., & Shumeiko, V. M. (2025). The question of the  $ZrO_2-TiO_2$  phase diagram. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology*, 2(14), 33–38. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.02.05>