

О. М. Борисенко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, К. О. Горбунов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, С. М. Логвінков<sup>2</sup>, д-р техн. наук, професор, Г. М. Шабанова<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор

## РОЗРАХУНКИ ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ СИСТЕМИ $ZrO_2-TiO_2-MgO$

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

<sup>2</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
Харків

**Ключові слова:** евтектика, температура плавлення, керамічні матеріали, субсолідусна будова, температура випалу.

### Вступ

Синтез нових матеріалів із наперед заданими експлуатаційними властивостями неможливий без ґрунтовного термодинамічного аналізу багатокомпонентних систем. Трикомпонентна система  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  привертає значну увагу у зв'язку з можливістю створення гетерофазних керамічних матеріалів із діелектричними характеристиками. Вона складається з трьох простих оксидів, властивості яких добре досліджені. Зокрема,  $MgO$  (периклаз) існує лише в одній модифікації з кубічною кристалічною ґраткою. Для  $TiO_2$  характерна наявність трьох поліморфних форм – анатазу, брукіту та рутилу, причому у високотемпературній області стабільною є модифікація рутилу. Діоксид цирконію ( $ZrO_2$ ) проявляє три кристалічні модифікації: моноклінну, тетрагональну та кубічну, а переходи між ними визначаються температурою та тиском. Тетрагональна фаза є метастабільною у вузькому температурному інтервалі та при охолодженні переходить у моноклінну, що супроводжується збільшенням об'єму і може спричиняти внутрішні напруження.

Фазові рівноваги в системі  $MgO-TiO_2$  досліджуються протягом тривалого часу. Перші роботи були присвячені сполукам  $Mg_2TiO_4$  (квандиліт) і  $MgTi_2O_5$  (карроїт), згодом було встановлено існування стехіометричної сполуки  $MgTiO_3$  (гейкеліт) [1–3]. Дититанат магнію  $MgTi_2O_5$  характеризується псевдобрукітовою кристалічною структурою. Керамічні матеріали на основі дититанату магнію належать до діелектриків і знаходять застосування в мікрохвильових технологіях [4, 5]. Сполука  $Mg_2TiO_4$  має структуру шпінельного типу. Кераміка на її основі широко використовується як діелектричний матеріал у резонаторах, фільтрах та антенах для систем зв'язку, радіолокації та глобального позиціонування, що функціонують у мікрохвильовому діапазоні [6–8]. Загалом, система  $MgO-TiO_2$  має важливе значення для матеріалознавства і титанової металургії, а також становить інтерес для петрологічних досліджень.

У системі  $ZrO_2-MgO$  хімічні сполуки не виявлені [9]. Для цієї системи характерною є наявність обмежених твердих розчинів діоксиду цирконію в периклазі, а також  $MgO$  у  $ZrO_2$ . Незважаючи на обмежене петрологічне значення, система є важливою для матеріалознавчих досліджень.

Для системи  $ZrO_2-TiO_2$  спочатку також не було встановлено утворення сполук, однак подальші дослідження високотемпературної області підтвердили існування фази  $ZrTiO_4$ , яка плавиться інконгруентно [10, 11]. Ця сполука набула широкого застосування в електрокераміці, зокрема у виробництві діелектричних резонаторів і телекомунікаційних компонентів. Загалом, система  $ZrO_2-TiO_2$  є перспективною для використання в

електронних та оптичних пристроях, включаючи конденсатори, п'єзоелектричні сенсори, ультразвукові двигуни та мікрохвильові резонатори [12, 13].

Фазові рівноваги в системі  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  були вперше досліджені у 1955 році, що дозволило побудувати попередню фазову діаграму в температурному інтервалі 1673–2023 К. Подальші експериментальні дослідження, зокрема робота [13], були спрямовані на вивчення фазових взаємодій при температурах понад 1530 К та оцінку термодинамічних параметрів при 1530, 1680 і 1880 К.

Авторами [14] була вивчена субсолідусна будова системи  $ZrO_2-TiO_2-MgO$ . В результаті термодинамічного аналізу системи встановлено, що система поділяється на 5 елементарних трикутників (рис. 1):  $TiO_2-MgTi_2O_5-ZrTiO_4$ ,  $ZrO_2-ZrTiO_4-MgTi_2O_5$ ,  $ZrO_2-MgTiO_3-MgTi_2O_5$ ,  $ZrO_2-MgTiO_3-Mg_2TiO_4$ ,  $ZrO_2-MgO-Mg_2TiO_4$ . Відповідно до даних [14] найбільшу площу має елементарний трикутник  $ZrO_2-MgO-Mg_2TiO_4$  (500 %). Він також має найменший ступінь асиметрії (2,00). Що свідчить про відсутність необхідності точного дозування компонентів та ретельного перемішування.  $Mg_2TiO_4$ , який входить до складу цього елементарного трикутника, має найвищу ймовірність існування, за винятком вихідного компонента  $ZrO_2$ .

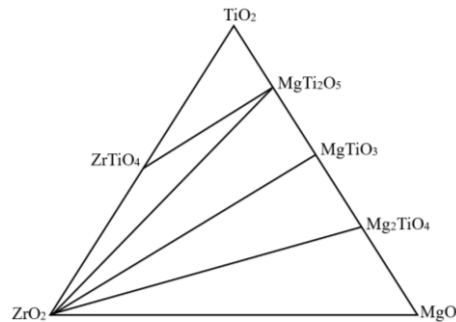


Рисунок 1 – Субсолідусна будова системи  $ZrO_2-TiO_2-MgO$

Для прогнозування температур синтезу та експлуатації керамічних матеріалів в системі  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  в роботі проведено розрахунки та аналіз температур і складів евтектик бінарних і потрійних перетинів системи.

### Теоретична частина

Для побудови поверхонь ліквідусу у полікомпонентних перерізах застосовували програмне забезпечення Eutectika 1.3.3 [15]. У табл. 1 наведено вихідні дані, які були використані для розрахунку температур і складів евтектичних точок у досліджуваній системі.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку температур і складів евтектик

Сполука	Кількість атомів у сполуці, N	Температура плавлення, К [16]
MgO	2	3098
ZrO <sub>2</sub>	3	2973
TiO <sub>2</sub>	3	2143
MgTiO <sub>3</sub>	5	1903
Mg <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	7	2005
MgTi <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8	1925
ZrTiO <sub>4</sub>	6	2093

Характеристики евтектик полікомпонентних перетинів системи  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика евтектичних точок бінарних та потрійних перетинів в системі  $ZrO_2-TiO_2-MgO$

№	Перетин	$T_{евт}$ , К	Склад евтектик, мол. %		
			$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	$TiO_2-MgTi_2O_5$	1762	52,30	47,70	–
2	$TiO_2-ZrTiO_4$	1822	59,00	41,00	–
3	$MgTi_2O_5-ZrTiO_4$	1812	60,70	39,30	–
4	$ZrO_2-MgTi_2O_5$	1880	17,50	82,50	–
5	$ZrO_2-MgTiO_3$	1841	15,79	84,21	–
6	$ZrO_2-Mg_2TiO_4$	1941	20,30	79,70	–
7	$ZrO_2-MgO$	2364	46,20	53,80	–
8	$MgTi_2O_5-MgTiO_3$	1727	40,00	60,00	–
9	$Mg_2TiO_4-MgTiO_3$	1748	35,80	64,20	–
10	$Mg_2TiO_4-MgO$	1912	71,70	28,90	–
11	$ZrO_2-ZrTiO_4$	2003	23,40	76,60	–
12	$TiO_2-MgTi_2O_5-ZrTiO_4$	1686	44,34	32,17	23,49
13	$ZrO_2-ZrTiO_4-MgTi_2O_5$	1779	13,36	34,72	51,92
14	$ZrO_2-MgTiO_3-MgTi_2O_5$	1699	10,55	54,90	34,55
15	$ZrO_2-MgTiO_3-Mg_2TiO_4$	1716	11,12	58,06	30,82
16	$ZrO_2-MgO-Mg_2TiO_4$	1857	16,48	26,27	57,25

### Результати та їх обговорення

З метою прогнозування температур синтезу та експлуатаційних характеристик керамічних матеріалів у системі  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  було проведено розрахунок і аналіз температур та складів евтектичних точок у бінарних і тернарних перерізах системи (табл. 2). Отримані результати дозволили встановити загальні закономірності формування евтектичних рівноваг і оцінити вплив компонентного складу на температурні параметри процесів плавлення та кристалізації.

Встановлено, що всі оксиди, які входять до складу досліджуваної системи, характеризуються високими температурами плавлення, що зумовлює відповідно високі значення температур евтектик як у подвійних (табл. 2), так і в потрійних підсистемах (рис. 1). Разом із тим, аналіз показав, що температури евтектичних точок у тернарних перерізах є нижчими порівняно з бінарними системами. Це свідчить про можливість зниження температур синтезу матеріалів за рахунок раціонального вибору складу в межах трикомпонентної системи, що є важливим з технологічної точки зору.

Дослідження субсолідусної будови системи  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  дозволило визначити характер фазових співвідношень і встановити області стабільності окремих фаз. Отримані дані є важливими для вибору оптимальних технологічних режимів синтезу, зокрема температурних інтервалів обробки та співвідношення компонентів, що забезпечують формування матеріалів із заданими властивостями. Крім того, результати дають змогу прогнозувати поведінку матеріалів в умовах експлуатації, включаючи їх термічну стабільність і фазову стійкість.

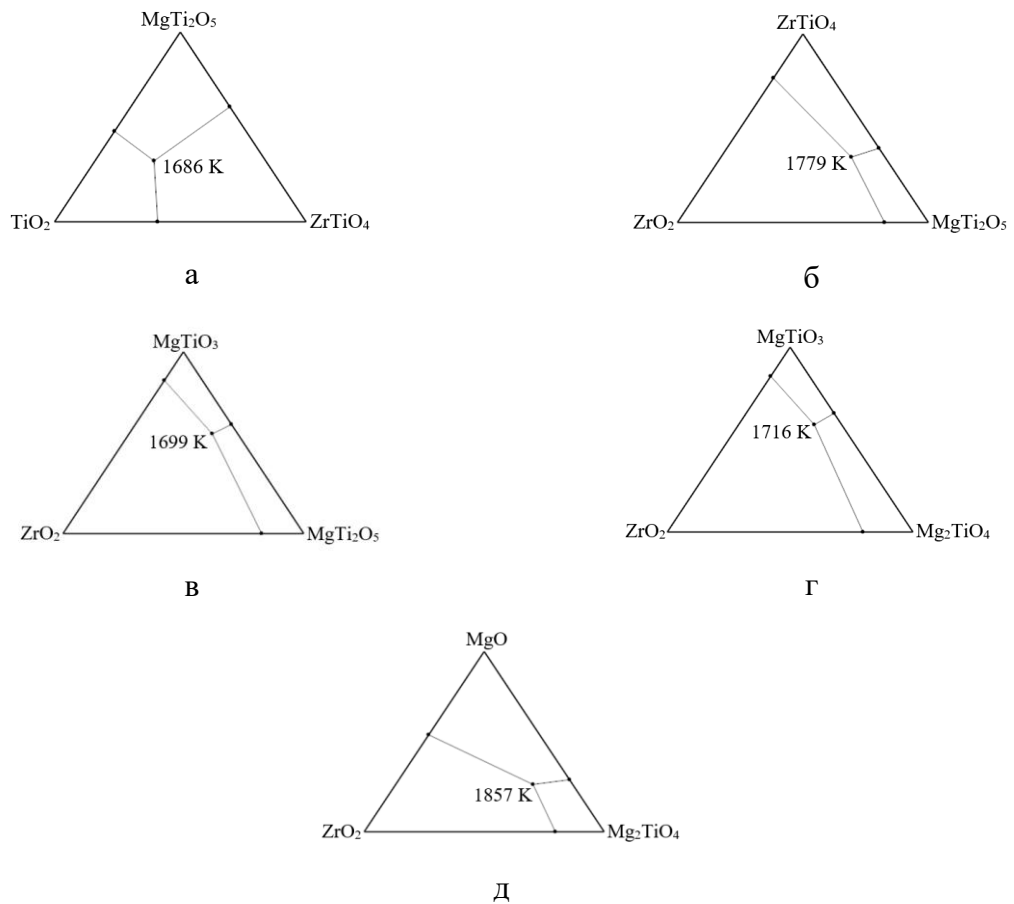


Рисунок 2 – Криві ліквідусу потрійних перерізів:  
 а)  $\text{TiO}_2\text{-MgTi}_2\text{O}_5\text{-ZrTiO}_4$ , б)  $\text{ZrO}_2\text{-ZrTiO}_4\text{-MgTi}_2\text{O}_5$ , в)  $\text{ZrO}_2\text{-MgTiO}_3\text{-MgTi}_2\text{O}_5$ ,  
 г)  $\text{ZrO}_2\text{-MgTiO}_3\text{-Mg}_2\text{TiO}_4$ , д)  $\text{ZrO}_2\text{-MgO-Mg}_2\text{TiO}_4$

На основі проведеного аналізу встановлено, що перспективною для створення нових діелектричних матеріалів із підвищеною термостійкістю є концентраційна область, обмежена елементарним трикутником  $\text{ZrO}_2\text{-MgO-Mg}_2\text{TiO}_4$ . У межах цієї області можливе формування стабільних фазових комбінацій, які поєднують високі діелектричні характеристики з покращеною термічною стійкістю. Це відкриває можливості для цілеспрямованого синтезу функціональних керамічних матеріалів, придатних для використання в сучасних мікрохвильових та електронних пристроях.

### Висновки

Встановлено закономірності формування евтектичних рівноваг у бінарних і тернарних перерізах системи. Показано, що всі евтектичні точки характеризуються високими температурами, що обумовлено високими температурами плавлення вихідних оксидів. Разом із тим, визначено, що температури евтектик у тернарних системах є нижчими порівняно з бінарними, що відкриває можливості для зниження температур синтезу матеріалів за рахунок оптимізації їх складу.

На основі аналізу субсолідусної будови системи встановлено області стабільності фаз і визначено характер фазових співвідношень. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору технологічних параметрів синтезу, зокрема температурних режимів і складу шихти, з метою формування матеріалів із заданими вла-

ствостями. Показано, що найбільш перспективною для створення термостійких діелектричних матеріалів є концентраційна область, обмежена елементарним трикутником  $ZrO_2$ – $MgO$ – $Mg_2TiO_4$ . У межах цієї області можливе утворення стабільних фазових композицій із поєднанням високих діелектричних характеристик і термічної стійкості.

Отримані результати розширюють уявлення про фазові рівноваги в системі  $ZrO_2$ – $TiO_2$ – $MgO$  та можуть бути використані при розробці нових функціональних керамічних матеріалів для застосування в сучасних електронних і мікрохвильових пристроях.

### Подяка

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

### Література

1. Jantzen T., Hack K., Yazhenskikh E., Müller M. Addition of  $TiO_2$  and  $Ti_2O_3$  to the  $Al_2O_3$ – $FeO$ – $Fe_2O_3$ – $MgO$  system. *Calphad*. 2018. Vol. 62. P. 187–200.
2. Woermann E., Brezny B., Muan A. Phase equilibria in the system  $MgO$ –iron oxide– $TiO_2$  in air. *American Journal of Science*. 1969. Vol. 267-A. P. 463–479.
3. Shindo I. Determination of the phase diagram by the slow cooling float zone method: the system  $MgO$ – $TiO_2$ . *Journal of Crystal Growth*. 1980. Vol. 50, No. 4. P. 839–851.
4. Suzuki Y., Shinoda Y. Magnesium dititanate ( $MgTi_2O_5$ ) with pseudobrookite structure: A review. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12, No. 3.
5. Samyukthaa V. S., Suvarna R. P., Raob T. S. Synthesis and dielectric properties of ceramic material. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2016. Vol. 5, No. 5. P. 245–249.
6. Chen Y.-B. Dielectric properties and crystal structure of  $Mg_2TiO_4$  ceramics substituting  $Mg^{2+}$  with  $Zn^{2+}$  and  $Co^{2+}$ . *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 513. P. 481–486.
7. Kumar S., Kumar R., Koo B. H., Choi H., Kim D. U., Lee C. G. Structural and electrical properties of  $Mg_2TiO_4$ . *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2009. Vol. 117, No. 1365. P. 689–692.
8. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova H., Arefiev V., Ishchenko A., Bykanov S. Regulating the properties of dielectric materials in the  $MgO$ – $Al_2O_3$ – $TiO_2$  system. *Proceedings of the 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology*. 2024. P. 1–4.
9. Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the  $ZrO_2$ – $MgO$ – $Al_2O_3$  system. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34, No. 5. P. 1397–1408.
10. Dondi M., Matteucci F., Cruciani G. Zirconium titanate ceramic pigments: Crystal structure, optical spectroscopy and technological properties. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 179, No. 1. P. 233–246.
11. Gu A., Pan G.-H., Wu H., Zhang L., Wu H., Zhang J. Microstructure and photoluminescence of  $ZrTiO_4:Eu^{3+}$  phosphors: Host-sensitized energy transfer and optical thermometry. *Chemosensors*. 2022. Vol. 10, No. 12. 527.
12. Saenko I., Ilatovskaia M., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the  $ZrO_2$ – $TiO_2$  system. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 101, No. 1. P. 386–399.

13. Saenko I., Tsukrenko V., Ilatovskaia M., Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase equilibria in the  $ZrO_2$ – $TiO_2$ – $MgO$  system. *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 21, No. 5. 1800655.
14. Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. Thermodynamic modeling of  $ZrO_2$ – $TiO_2$ – $MgO$  system. *Proceedings of the 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology*. 2025. P. 1–4.
15. Програма для розрахунку температури евтектики у багатокомпонентних системах. URL: <https://chefranov.name/projects/eutektika/> (дата звернення: 24.04.2026).
16. Бережний А. С. Багатокомпонентні системи оксидів. Київ: Наукова думка, 1970. 544 с.

## Bibliography (transliterated)

1. Jantzen T., Hack K., Yazhenskikh E., Müller M. Addition of  $TiO_2$  and  $Ti_2O_3$  to the  $Al_2O_3$ – $FeO$ – $Fe_2O_3$ – $MgO$  system. *Calphad*. 2018. Vol. 62. P. 187–200.
2. Woermann E., Brezny B., Muan A. Phase equilibria in the system  $MgO$ –iron oxide– $TiO_2$  in air. *American Journal of Science*. 1969. Vol. 267-A. P. 463–479.
3. Shindo I. Determination of the phase diagram by the slow cooling float zone method: the system  $MgO$ – $TiO_2$ . *Journal of Crystal Growth*. 1980. Vol. 50, No. 4. P. 839–851.
4. Suzuki Y., Shinoda Y. Magnesium dititanate ( $MgTi_2O_5$ ) with pseudobrookite structure: A review. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12, No. 3.
5. Samyukthaa V. S., Suvarna R. P., Raob T. S. Synthesis and dielectric properties of ceramic material. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2016. Vol. 5, No. 5. P. 245–249.
6. Chen Y.-B. Dielectric properties and crystal structure of  $Mg_2TiO_4$  ceramics substituting  $Mg^{2+}$  with  $Zn^{2+}$  and  $Co^{2+}$ . *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 513. P. 481–486.
7. Kumar S., Kumar R., Koo B. H., Choi H., Kim D. U., Lee C. G. Structural and electrical properties of  $Mg_2TiO_4$ . *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2009. Vol. 117, No. 1365. P. 689–692.
8. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova H., Arefiev V., Ishchenko A., Bykanov S. Regulating the properties of dielectric materials in the  $MgO$ – $Al_2O_3$ – $TiO_2$  system. *Proceedings of the 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology*. 2024. P. 1–4.
9. Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the  $ZrO_2$ – $MgO$ – $Al_2O_3$  system. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34, No. 5. P. 1397–1408.
10. Dondi M., Matteucci F., Cruciani G. Zirconium titanate ceramic pigments: Crystal structure, optical spectroscopy and technological properties. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 179, No. 1. P. 233–246.
11. Gu A., Pan G.-H., Wu H., Zhang L., Wu H., Zhang J. Microstructure and photoluminescence of  $ZrTiO_4:Eu^{3+}$  phosphors: Host-sensitized energy transfer and optical thermometry. *Chemosensors*. 2022. Vol. 10, No. 12. 527.
12. Saenko I., Ilatovskaia M., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the  $ZrO_2$ – $TiO_2$  system. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 101, No. 1. P. 386–399.
13. Saenko I., Tsukrenko V., Ilatovskaia M., Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase equilibria in the  $ZrO_2$ – $TiO_2$ – $MgO$  system. *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 21, No. 5. 1800655.

14. Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. Thermodynamic modeling of ZrO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>–MgO system. *Proceedings of the 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology*. 2025. P. 1–4.

15. Prohrama dlia rozrakhunku temperatury evtektiky u bahatokomponentnykh systemakh. URL: <https://chefranov.name/projects/eutektika/>, (data zvernennia: 24.04.2026).

16. Bereznyi A. S. Bahatokomponentni systemy oksydiv. Kyiv: Naukova dumka, 1970. 544 p.

УДК 666.651

О. М. Борисенко, д-р техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доцент, С. М. Логвінков, д-р техн. наук, професор, Г. М. Шабанова, д-р техн. наук, професор

### **РОЗРАХУНКИ ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ СИСТЕМИ ZrO<sub>2</sub> – TiO<sub>2</sub> – MgO**

Розробка нових матеріалів із наперед визначеними експлуатаційними характеристиками є неможливою без глибокого термодинамічного аналізу багатокomпонентних систем. Значний інтерес становить трикомпонентна система ZrO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>–MgO, яка дає змогу створювати гетерофазні керамічні матеріали з заданими діелектричними властивостями. У роботі досліджено фазові рівноваги та термодинамічні особливості трикомпонентної системи ZrO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>–MgO з метою прогнозування умов синтезу та експлуатації діелектричних керамічних матеріалів. Проведено аналіз літературних даних щодо властивостей вихідних оксидів і подвійних систем, а також розглянуто субсолідусну будову досліджуваної системи. У результаті проведеного термодинамічного аналізу встановлено, що система розпадається на п'ять елементарних трикутників: TiO<sub>2</sub> – MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – ZrTiO<sub>4</sub>, ZrO<sub>2</sub> – ZrTiO<sub>4</sub> – MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZrO<sub>2</sub> – MgTiO<sub>3</sub> – MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZrO<sub>2</sub> – MgTiO<sub>3</sub> – Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, ZrO<sub>2</sub> – MgO – Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>. Для визначення температур і складів евтектичних точок у бінарних і тернарних перерізах використано програмне забезпечення Eutektika 1.3.3. Встановлено, що всі евтектичні перетворення характеризуються високими температурами, що зумовлено високими температурами плавлення компонентів системи. Показано, що евтектики в тернарних перерізах мають нижчі температури порівняно з бінарними, що створює передумови для зниження температур синтезу матеріалів. Визначено області стабільності фаз і встановлено, що найбільш перспективною для створення термостійких діелектричних матеріалів є концентраційна область, обмежена трикутником ZrO<sub>2</sub>–MgO–Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>. У межах цієї області можливе утворення стабільних фазових композицій із поєднанням високих діелектричних характеристик і термічної стійкості Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних параметрів синтезу та розробки нових функціональних керамічних матеріалів для застосування в мікрохвильовій та електронній техніці.

**Ключові слова:** евтектика, температура плавлення, керамічні матеріали, субсолідусна будова, температура випалу.

O. M. Borysenko, K. O. Gorbunov, S. M. Logvinkov, G. M. Shabanova

### **CALCULATIONS OF TEMPERATURES AND COMPOSITIONS OF EUTEKTICS OF MULTICOMPONENT SECTIONS OF THE ZrO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>–MgO SYSTEM**

The development of new materials with predetermined operational characteristics is impossible without a deep thermodynamic analysis of multicomponent systems. Of considerable interest is the ternary system  $ZrO_2-TiO_2-MgO$ , which allows creating heterophase ceramic materials with specified dielectric properties. The phase equilibria and thermodynamic features of the ternary system  $ZrO_2-TiO_2-MgO$  are studied in order to predict the conditions for the synthesis and operation of dielectric ceramic materials. An analysis of the literature data on the properties of the starting oxides and binary systems is carried out, and the subsolidus structure of the system under study is also considered. As a result of the thermodynamic analysis, it was found that the system decomposes into five elementary triangles:  $TiO_2-MgTi_2O_5-ZrTiO_4$ ,  $ZrO_2-ZrTiO_4-MgTi_2O_5$ ,  $ZrO_2-MgTiO_3-MgTi_2O_5$ ,  $ZrO_2-MgTiO_3-Mg_2TiO_4$ ,  $ZrO_2-MgO-Mg_2TiO_4$ . To determine the temperatures and compositions of eutectic points in binary and ternary sections, the Eutektika 1.3.3 software was used. It was found that all eutectic transformations occur at high temperatures, due to the high melting points of the system components. It was shown that eutectics in ternary systems have lower melting temperatures than those in binary systems, which creates the prerequisites for reducing the synthesis temperatures of materials. The regions of phase stability have been determined and it has been established that the most promising for the creation of heat-resistant dielectric materials is the concentration region bounded by the  $ZrO_2-MgO-Mg_2TiO_4$  triangle. Within this region, stable phase compositions with high dielectric properties and thermal stability can be formed. The results obtained can be used to optimize the technological parameters of the synthesis and development of new functional ceramic materials for use in microwave and electronic engineering.

**Keywords:** eutectic, melting point, ceramic materials, subsolidus structure, firing temperature.

Отримано редколегією 27.03.2026

**Борисенко Оксана Миколаївна (Oksana Borysenko)**, д-р техн. наук, професор, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>;

**Горбунов Костянтин Олександрович (Kostiantyn Gorbunov)**, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-0078-6520>;

**Логвінков Сергій Михайлович (Sergey Logvinkov)**, д-р техн. наук, професор, професор Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>;

**Шабанова Галина Миколаївна (Galina Shabanova)**, д-р техн. наук, професор, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>.