

УДК 544.3

doi:10.20998/2413-4295.2025.03.06

СУБСОЛІДУСНА БУДОВА СИСТЕМИ BaO – MgO – ZrO₂

О. М. БОРИСЕНКО^{1*}, С. М. ЛОГВІНКОВ², Р. В. КРИВОБОК¹, Г. В. ЛІСАЧУК¹,
В. В. ВОЛОЩУК¹, О. Р. ТИМЧЕНКО¹

¹ кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

² кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: onborisenko@ukr.net

АНОТАЦІЯ Діоксид цирконію (ZrO₂) є одним з найбільш перспективних матеріалів сучасної кераміки завдяки поєднанню високої міцності, тріщиностійкості, корозійної та зносостійкості, низької теплопровідності та високої термостійкості. Проте використання чистого ZrO₂ обмежене через фазові переходи між його поліморфними модифікаціями, що супроводжуються об'ємними змінами та утворенням дефектів. Для стабілізації застосовують оксидні добавки (Y₂O₃, MgO, BaO, CeO₂ тощо), які утворюють тверді розчини та перешкоджають руйнівним перетворенням. Особливий інтерес становить система BaO–MgO–ZrO₂, що є основою для створення термостабільних діелектричних матеріалів, придатних для використання у сучасних телекомунікаційних і радіотехнічних пристроях. Розглянуто субсолідусну будову цієї системи з використанням розрахункових методів геометро-топологічного аналізу. В системі наявні стабільні фази BaO, MgO, ZrO₂, Ba₂ZrO₄, Ba₃Zr₂O₇ і BaZrO₃. Проведено триангуляцію потрібної діаграми, яка показала існування чотирьох елементарних трикутників: BaO–MgO–Ba₂ZrO₄, Ba₂ZrO₄–MgO–Ba₃Zr₂O₇, Ba₃Zr₂O₇–MgO–BaZrO₃, BaZrO₃–MgO–ZrO₂. Найбільшою площею та найменшим ступенем асиметрії характеризується трикутник BaZrO₃–MgO–ZrO₂, що зумовлює високу ймовірність фазоутворення у відповідній концентраційній області та відносну нечутливість до відхилень у складі. Навпаки, сполука Ba₃Zr₂O₇ має мінімальну ймовірність існування і обмежену стабільність через диспропорціонування за підвищених температур. Виконано розрахунок евтектичних точок бінарних і потрібних перетинів, що дозволило визначити температурні межі утворення розплаву та перспективні області синтезу. Показано, що найбільш придатними для розробки термостабільних діелектричних керамічних матеріалів є області, обмежені фазами MgO, BaZrO₃ та ZrO₂. Отримані результати мають практичне значення для оптимізації складу та технології виготовлення високоякісної діелектричної кераміки.

Ключові слова: субсолідусна будова; фазові рівноваги; геометро-топологічні характеристики; евтектичні точки; діелектрична кераміка

SUBSOLIDUS STRUCTURE OF THE SYSTEM BaO – MgO – ZrO₂

О. BORYSENKO¹, S. LOGVINKOV², R. KRYVOBOK¹, G. LISACHUK¹,
V. VOLOSHCHUK¹, O. TYMCHENKO¹

¹Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

²Department of Occupational Health and Safety, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Zirconium dioxide (ZrO₂) is one of the most promising materials for advanced ceramics due to its combination of high strength, fracture toughness, corrosion and wear resistance, low thermal conductivity, and high thermal stability. However, pure ZrO₂ is limited by phase transitions between its polymorphic modifications, which are accompanied by volume changes and defect formation. To stabilize its structure, oxide additives (Y₂O₃, MgO, BaO, CeO₂, etc.) are applied, forming solid solutions and preventing destructive transformations. The BaO–MgO–ZrO₂ system is exciting, which serves as a basis for developing thermally stable dielectric materials suitable for modern telecommunication and radio engineering applications. The subsolidus structure of this system has been examined using computational methods of geometrical-topological analysis. The stable phases present in the system are BaO, MgO, ZrO₂, Ba₂ZrO₄, Ba₃Zr₂O₇, and BaZrO₃. Triangulation of the ternary diagram revealed four elementary triangles: BaO–MgO–Ba₂ZrO₄, Ba₂ZrO₄–MgO–Ba₃Zr₂O₇, Ba₃Zr₂O₇–MgO–BaZrO₃, and BaZrO₃–MgO–ZrO₂. The BaZrO₃–MgO–ZrO₂ triangle is characterized by the most significant area and the lowest degree of asymmetry, which ensures a high probability of phase formation in the corresponding compositional region and relative insensitivity to deviations in composition. In contrast, the Ba₃Zr₂O₇ compound shows minimal probability of existence and limited stability due to disproportionation at elevated temperatures. Calculations of eutectic points for binary and ternary sections made it possible to determine the temperature limits of melt formation and identify promising synthesis regions. It is shown that the most suitable areas for developing thermally stable dielectric ceramic materials are the areas bounded by the MgO, BaZrO₃, and ZrO₂ phases. The results obtained are of practical importance for optimizing the composition and technology of producing high-quality dielectric ceramics.

Keywords: subsolidus structure; phase equilibria; geometric-topological characteristics; eutectic points; dielectric ceramics

Вступ

Діоксид цирконію (ZrO₂) є одним з найбільш перспективних матеріалів для сучасної кераміки

завдяки поєднанню високої міцності, твердості, тріщиностійкості, корозійної та зносостійкості, а також низької теплопровідності та високої термостійкості. Ці властивості роблять його

затребуваним у конструкційній, функціональній, біомедичній та електронній кераміці [1–3].

Однак використання чистого ZrO_2 обмежене через фазові переходи між його поліморфними модифікаціями (моноклінною, тетрагональною та кубичною), що супроводжуються значними об'ємними змінами та утворенням дефектів. Це призводить до зниження експлуатаційних характеристик матеріалу.

Для стабілізації ZrO_2 застосовуються різні оксидні добавки (Y_2O_3 , BaO , MgO , CeO_2 , TiO_2 та ін.), що утворюють тверді розчини та перешкоджають руйнівним фазовим перетворенням [4–7].

Очевидно, що знання фазової діаграми та термодинамічних властивостей має фундаментальне значення для визначення умов синтезу цих матеріалів та із заданими експлуатаційними характеристиками.

Незважаючи на те, що фазові рівноваги в бінарних підсистемах $BaO-MgO$ [8,9], $BaO-ZrO_2$ [10,11] та $MgO-ZrO_2$ [12,13] досить добре досліджені, відомостей про субсолідусну будову потрійної системи $BaO-MgO-ZrO_2$ у літературі не виявлено.

Таким чином, дослідження субсолідусної будови системи $BaO-MgO-ZrO_2$ є актуальним, оскільки дана система є основою для створення термостабільних діелектричних керамічних матеріалів, придатних до застосування у сучасних телекомунікаційних та радіотехнічних пристроях.

Мета роботи

Основна мета роботи полягає у встановленні геометро-топологічних характеристик субсолідусної будови системи $BaO-MgO-ZrO_2$ на основі розрахункових методів, їх комплексному аналізі та використанні отриманих даних для визначення раціональних концентраційних областей синтезу діелектричних керамічних матеріалів.

Виклад основного матеріалу

У трикомпонентній системі $BaO-MgO-ZrO_2$ стабільними фазами є BaO , MgO , ZrO_2 , Ba_2ZrO_4 , $Ba_3Zr_2O_7$, $BaZrO_3$. В двокомпонентних системах $BaO-MgO$ та $MgO-ZrO_2$ бінарних оксидних сполук не існує. В системі $BaO-ZrO_2$ існує три сполуки: Ba_2ZrO_4 , $Ba_3Zr_2O_7$, $BaZrO_3$. Таким чином, не виконуючі термодинамічні розрахунки, триангуляція досліджуваної системи має вигляд наведений на рис. 1, та розбивається на чотири елементарні трикутники: $BaO-MgO-Ba_2ZrO_4$, $Ba_2ZrO_4-MgO-Ba_3Zr_2O_7$, $Ba_3Zr_2O_7-MgO-BaZrO_3$, $BaZrO_3-MgO-ZrO_2$.

Розбиття системи $BaO-MgO-ZrO_2$ на елементарні трикутники узгоджується з правилом Курнакова [14], що дає значення $X = 1 + 3 = 4$.

Для характеристики субсолідусної області виконано розрахунок довжин коннод, результати наведено у табл. 1.

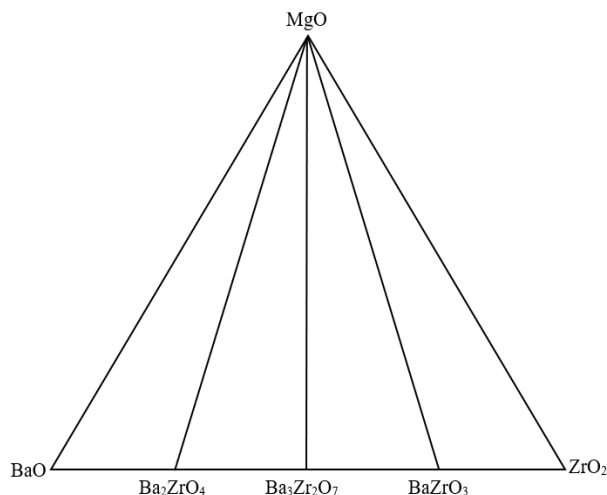


Рис. 1 – Триангуляція системи $BaO-MgO-ZrO_2$

Таблиця 1 – Довжини коннод (L, %) системи $BaO-MgO-ZrO_2$

№	Позначення конноди	L, %
1	$BaO-MgO$	1000
2	$MgO-Ba_2ZrO_4$	892
3	$BaO-Ba_2ZrO_4$	287
4	$MgO-Ba_3Zr_2O_7$	879
5	$Ba_2ZrO_4-Ba_3Zr_2O_7$	62
6	$MgO-BaZrO_3$	868
7	$Ba_3Zr_2O_7-BaZrO_3$	97
8	$BaZrO_3-ZrO_2$	554
9	$MgO-ZrO_2$	1000
10	$BaO-ZrO_2$	1000

У табл. 2 і 3 представлені основні геометро-топологічні параметри субсолідусної структури системи та її фаз: площі елементарних трикутників, ступінь їх асиметрії (L_{max}/L_{min}), площі фазових областей та ймовірності існування відповідних фаз.

Таблиця 2 – Характеристика елементарних трикутників системи $BaO-MgO-ZrO_2$

№	Елементарний трикутник	Площа, %	Ступінь асиметрії
1	$BaO-MgO-Ba_2ZrO_4$	287	3,48
2	$Ba_2ZrO_4-MgO-Ba_3Zr_2O_7$	62	14,39
3	$Ba_3Zr_2O_7-MgO-BaZrO_3$	97	9,06
4	$BaZrO_3-MgO-ZrO_2$	554	1,81
Σ		1000	–

Таблиця 3 – Геометро-топологічні характеристики фаз системи BaO–MgO–ZrO₂

Сполука	Зі скількома фазами співіснує	У скількох трикутниках існує	Площа існування, S _i , %	Ймовірність існування, ω
BaO	2	1	287	0,096
MgO	5	4	1000	0,333
ZrO ₂	2	1	554	0,185
Ba ₂ ZrO ₄	3	2	349	0,116
Ba ₃ Zr ₂ O ₇	3	2	159	0,053
BaZrO ₃	3	2	651	0,217
Σ	–	–	3000	1,000
max			1000	0,333
min			159	0,053

Для матеріалів системи BaO–MgO–ZrO₂ проведено розрахунок температур і складів евтектик бінарних та потрійних перетинів для прогнозування утворення розплаву та контролю його кількості під час спікання, а також для прогнозування температур експлуатації отриманих матеріалів.

Поверхні ліквідусу побудовано за допомогою програми Eutektika 1.3.3 [15] за допомогою вихідних даних наведених в табл. 4.

Характеристики евтектичних точок перетинів системи BaO–MgO–ZrO₂ представлено у табл. 5.

Таблиця 4 – Вихідні дані для розрахунку температур і складів евтектик

Сполука	Кількість атомів у сполуці, N	Температура плавлення, К
BaO	2	2196 [10]
MgO	2	3098 [14]
ZrO ₂	3	2973 [14]
Ba ₂ ZrO ₄	7	2621 [10]
Ba ₃ Zr ₂ O ₇	12	1650 [10]
BaZrO ₃	5	2993 [10]

Таблиця 5 – Характеристика евтектичних точок бінарних та потрійних перетинів в системі BaO–MgO–ZrO₂

№	Перетин	T _{евт} , К	Склад евтектик, мол. %		
			X ₁	X ₂	X ₃
1	BaO – MgO	1884	72,20	27,80	–
2	MgO – Ba ₂ ZrO ₄	2362	53,60	46,40	–
3	BaO – Ba ₂ ZrO ₄	2044	86,19	13,81	–
4	MgO – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	1627	16,38	83,62	–
5	Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	1648	1,60	98,40	–
6	MgO – BaZrO ₃	2505	62,30	37,70	–
7	Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaZrO ₃	1648	98,32	1,68	–
8	BaZrO ₃ – ZrO ₂	2535	40,50	59,50	–
9	MgO – ZrO ₂	2365	53,80	46,20	–
10	BaO – ZrO ₂	1961	78,70	21,30	–
11	BaO – MgO – Ba ₂ ZrO ₄	1849	68,72	25,90	5,38
12	Ba ₂ ZrO ₄ – MgO – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	1624	1,36	16,27	82,37
13	Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – MgO – BaZrO ₃	1624	82,28	16,26	1,46
14	BaZrO ₃ – MgO – ZrO ₂	2226	17,83	45,65	36,52

Обговорення результатів

Відповідно до розрахункових даних (табл. 2) найбільшу площу (554 %) має елементарний

трикутник BaZrO₃ – MgO – ZrO₂. Він також має найменший ступінь асиметрії (1,81). Сполуки, які входять до цього трикутника мають найбільші площі існування та ймовірність існування (табл. 3): MgO

(1000 ‰; 0,333 відповідно), BaZrO_3 (651 ‰; 0,217 відповідно) та ZrO_2 (554 ‰; 0,185). Це свідчить про відсутність необхідності в точному дозуванні компонентів і ретельності їх змішування, тобто невеликі відхилення у складі не впливають істотно на фазоутворення, що є суттєвою технологічною перевагою.

Найменшу ймовірність існування має $\text{Ba}_3\text{Zr}_2\text{O}_7$ (0,053), який входить до складу двох елементарних трикутників, з найменшими площами: $\text{Ba}_2\text{ZrO}_4 - \text{MgO} - \text{Ba}_3\text{Zr}_2\text{O}_7$ (62 ‰) та $\text{Ba}_3\text{Zr}_2\text{O}_7 - \text{MgO} - \text{BaZrO}_3$ (97 ‰), що вказує на необхідність чіткого дотримання всіх технологічних параметрів масопідготовчих

операцій. Також, необхідно мати на увазі, що сполука $\text{Ba}_3\text{Zr}_2\text{O}_7$ диспропорціонує за температури 1650 K [10].

Елементарний трикутник $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{Ba}_2\text{ZrO}_4$ має середню площу та середній ступінь асиметрії порівняно з іншими трьома трикутниками.

Виходячи з розрахунку евтектичних точок бінарних та потрійних перетинів в системі $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$ (табл. 5) перспективними областями для виготовлення термостабільних діелектричних керамічних матеріалів є перетини (рис. 2, 3): $\text{MgO} - \text{Ba}_2\text{ZrO}_4$, $\text{MgO} - \text{BaZrO}_3$, $\text{BaZrO}_3 - \text{ZrO}_2$, $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{Ba}_2\text{ZrO}_4$, $\text{BaZrO}_3 - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$.

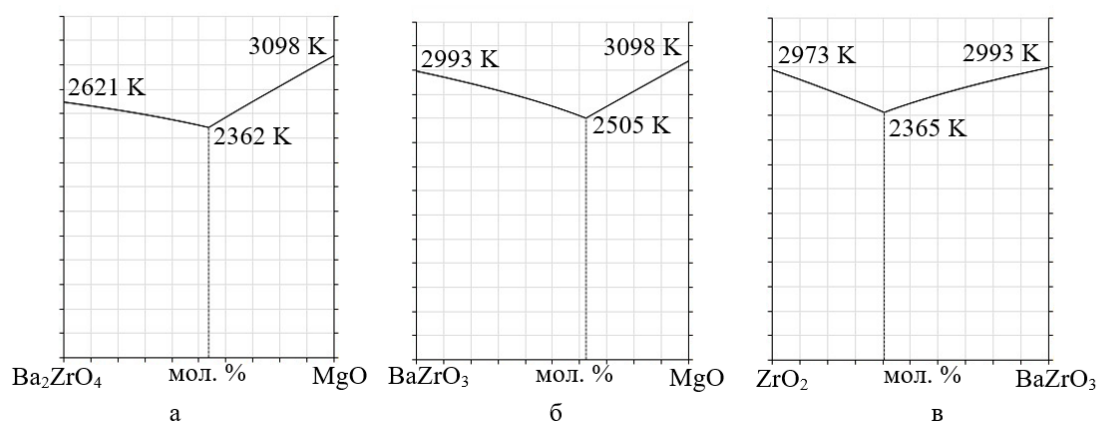


Рис. 2 – Криві ліквідусу бінарних перерізів:
а) $\text{MgO} - \text{Ba}_2\text{ZrO}_4$, б) $\text{MgO} - \text{BaZrO}_3$, в) $\text{BaZrO}_3 - \text{ZrO}_2$

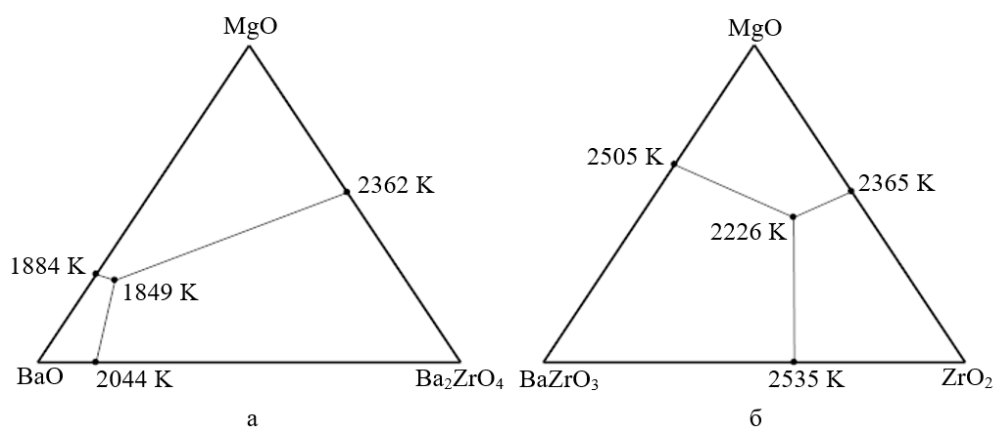


Рис. 3 – Криві ліквідусу потрійних перерізів:
а) $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{Ba}_2\text{ZrO}_4$, б) $\text{BaZrO}_3 - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$

Висновки

Результати проведених розрахунків свідчать, що найбільш сприятливими умовами фазоутворення у системі $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$ характеризується область, яка відповідає елементарному трикутнику $\text{BaZrO}_3 - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$. Вона відзначається найбільшою площею та найменшим ступенем асиметрії, а фази, що її утворюють, мають високі площі існування та значну ймовірність формування. Це вказує на відносну простоту технологічної реалізації матеріалів у даній

області, оскільки фазовий склад не є надмірно чутливим до відхилень у дозуванні та ретельності змішування компонентів. На противагу цьому, сполука $\text{Ba}_3\text{Zr}_2\text{O}_7$ характеризується мінімальною ймовірністю існування та належить до елементарних трикутників з найменшими площами, що зумовлює необхідність максимально точного дотримання технологічних параметрів для її отримання. Додатковим обмежувальним фактором є її диспропорціонування за підвищених температур, що знижує перспективність використання. Проміжне

положення трикутника BaO – MgO – Ba₂ZrO₄ свідчить про його менш виражену, але все ж достатню стабільність. Урахування розрахованих евтектичних точок підтверджує, що найбільш перспективними для створення термостабільних діелектричних керамічних матеріалів є області, пов'язані з фазами MgO, BaZrO₃ та ZrO₂, що дозволяє визначити їх як базові у формуванні високоякісних керамічних систем.

Подяка: дослідження здійснювались 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. Zhang X., Wu X., Shi J. Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No 4. P. 9029–9048. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.05.131.
2. Hjerpe J., Özcan M. Zirconia: More and More Translucent. *Current Oral Health Reports*. 2023. Vol. 10. No 4. P. 1–9. doi: 10.1007/s40496-023-00344-1.
3. Garanin Y., Shakirzyanov R., Borgekov D., Volodina N., Shlimas D., Zdorovets M. Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 29398. doi: 10.1038/s41598-024-80399-x.
4. Petriceanu M., Ioniță F. G., Piticescu R. R., Nicoară A. I., Matei A. C., Ioța M. A., Tudor I. A., Caramarin Ș., Ciobota C. F. Effect of Doping ZrO₂ on Structural and Thermal Properties. *Inorganics*. 2024. Vol. 12, No 11. 290. doi: 10.3390/inorganics12110290.
5. Chitoria A. K., Mir A., Shah M. A. A review of ZrO₂ nanoparticles applications and recent advancements. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49, No 20. P. 32343–32358. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.06.296.
6. Pang L.-X., Fang Z., Zhou D., Wang W., Shi Z.-Q., Hussain F., Darwish M. A., Zhou T., Sun S.-K., Liang Q.-X., Chen Y.-W. Sintering behaviors and microwave dielectric properties of BaO–MgO–SiO₂ ternary ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024. Vol. 21. P. 3652–3659. doi: 10.1111/ijac.14802.
7. Kenzhina I. E., Kozlovskiy A. L., Begentayev M., Blynskiy P., Tolenova A., Popov A. I. Study of Phase Transformations in ZrO₂ Ceramics Stabilized by Y₂O₃ and Their Role in Changing Strength Characteristics and Heat Resistance. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No 10. 4284. doi: 10.3390/su17104284.
8. Zhang R., Taskinen P. A thermodynamic assessment of the BaO–MgO, BaO–CaO, BaO–Al₂O₃ and BaO–SiO₂ systems. 2014. URL: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5613-5> (accessed: 20.08.2025).
9. Kolodiaznyi T., Belik A., Ozawa T., Takayama-Muromachi E. Phase equilibria in the BaO–MgO–Ta₂O₅ system. *Journal of Materials Chemistry*. 2009. Vol. 19. No 43. doi: 10.1039/b912485c.
10. Gong W.-p., Chen T.-f., Jin Z.-p. Thermodynamic investigation of ZrO₂–BaO system. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007. Vol. 17, No 2. P. 232–237. doi: 10.1016/S1003-6326(07)60077-6.

11. Lin C., Wang S., Chen G., Wang K., Cheng Z., Lu X., Li C. Thermodynamic evaluation of the BaO–ZrO₂–YO_{1.5} system. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42, No 12. P. 13738–13747. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.05.172.
12. López J. A. O., Pérez A. E. C., Cruz M. G. H., Morales M. E. O., Meraz E. del Á., Gómez C. E. Synthesis and characterization of MgO–ZrO₂ mixed oxides prepared by the sol-gel method. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. 2025. Vol. 20. 63. doi: 10.1186/s40712-025-00275-y.
13. Baudín C., Pena P. The main role of the ZrO₂–MgO–CaO and ZrO₂–MgO–CaO–SiO₂ systems in the field of refractories. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2022. Vol. 61, No 1. P. S6–S18. doi: 10.1016/j.bsecv.2021.09.009.
14. Бережной А. С. *Многокомпонентные системы окислов*. Киев: Наукова думка, 1970. 544 с.
15. Програма для розрахунку температури евтектик у багатокомпонентних системах. URL: <https://chefranov.name/projects/eutektika/> (дата звернення: 27.08.2025).

References (transliterated)

1. Zhang X., Wu X., Shi J. Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, Vol. 9, no. 4, pp. 9029–9048, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.05.131.
2. Hjerpe J., Özcan M. Zirconia: More and More Translucent. *Current Oral Health Reports*, 2023, Vol. 10, no. 4, pp. 1–9, doi: 10.1007/s40496-023-00344-1.
3. Garanin Y., Shakirzyanov R., Borgekov D., Volodina N., Shlimas D., Zdorovets M. Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, 29398, doi: 10.1038/s41598-024-80399-x.
4. Petriceanu M., Ioniță F. G., Piticescu R. R., Nicoară A. I., Matei A. C., Ioța M. A., Tudor I. A., Caramarin Ș., Ciobota C. F. Effect of Doping ZrO₂ on Structural and Thermal Properties. *Inorganics*, 2024, Vol. 12, no. 11, 290, doi: 10.3390/inorganics12110290.
5. Chitoria A. K., Mir A., Shah M. A. A review of ZrO₂ nanoparticles applications and recent advancements. *Ceramics International*, 2023, Vol. 49, no. 20, pp. 32343–32358, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.06.296.
6. Pang L.-X., Fang Z., Zhou D., Wang W., Shi Z.-Q., Hussain F., Darwish M. A., Zhou T., Sun S.-K., Liang Q.-X., Chen Y.-W. Sintering behaviors and microwave dielectric properties of BaO–MgO–SiO₂ ternary ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024, Vol. 21, pp. 3652–3659, doi: 10.1111/ijac.14802.
7. Kenzhina I. E., Kozlovskiy A. L., Begentayev M., Blynskiy P., Tolenova A., Popov A. I. Study of Phase Transformations in ZrO₂ Ceramics Stabilized by Y₂O₃ and Their Role in Changing Strength Characteristics and Heat Resistance. *Sustainability*, 2025, Vol. 17, no. 10, 4284, doi: 10.3390/su17104284.
8. Zhang R., Taskinen P. A thermodynamic assessment of the BaO–MgO, BaO–CaO, BaO–Al₂O₃ and BaO–SiO₂ systems. 2014. Available at: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5613-5> (accessed 20.08.2025).
9. Kolodiaznyi T., Belik A., Ozawa T., Takayama-Muromachi E. Phase equilibria in the BaO–MgO–Ta₂O₅ system. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, Vol. 19, no. 43, doi: 10.1039/b912485c.

10. Gong W.-p., Chen T.-f., Jin Z.-p. Thermodynamic investigation of ZrO_2 -BaO system. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, Vol. 17, no. 2, pp. 232-237, doi: 10.1016/S1003-6326(07)60077-6.
11. Lin C., Wang S., Chen G., Wang K., Cheng Z., Lu X., Li C. Thermodynamic evaluation of the $\text{BaO-ZrO}_2\text{-YO}_{1.5}$ system. *Ceramics International*, 2016, Vol. 42, no 12, pp. 13738–13747, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.05.172.
12. López J. A. O., Pérez A. E. C., Cruz M. G. H., Morales M. E. O., Meraz E. del Á., Gómez C. E. Synthesis and characterization of MgO-ZrO_2 mixed oxides prepared by the sol-gel method. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 2025, Vol. 20, 63, doi: 10.1186/s40712-025-00275-y.
13. Baudín C., Pena P. The main role of the $\text{ZrO}_2\text{-MgO-CaO}$ and $\text{ZrO}_2\text{-MgO-CaO-SiO}_2$ systems in the field of refractories. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2022, Vol. 61, no 1, pp. S6–S18, doi: 10.1016/j.bsecv.2021.09.009.
14. Berezhnoy A. S. *Mnogokomponentnyye sistemy okislov* [Multicomponent oxide systems], Kiyev. Naukova dumka, 1970, 544 p.
15. Prohrama dlya rozrakhunku temperatury evtektyk u bahatokomponentnykh systemakh [Program for calculating eutectic temperatures in multicomponent systems]. Available at: <https://chefranov.name/projects/eutektika/> (accessed 27.08.2025).

Відомості про авторів (About authors)

Борисенко Оксана Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2746-6797; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Oksana Borysenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2746-6797; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Логвінков Сергій Михайлович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, професор кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5957-2386; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Sergey Logvinkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Occupational Health and Safety, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5957-2386; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Кривобок Руслан Вікторович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач науково-дослідної частини; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2334-4434; e-mail: Ruslan.Krivobok@khp.edu.ua.

Kryvobok Ruslan – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head, Scientific and Research Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2334-4434; e-mail: Ruslan.Krivobok@khp.edu.ua.

Лісачук Георгій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», заступник завідувача науково-дослідної частини; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7157-9115; e-mail: lisachuk@kpi.kharkov.ua.

Lisachuk Georgiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head, Scientific and Research Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7157-9115; e-mail: lisachuk@kpi.kharkov.ua.

Волощук Валентина Василівна – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник науково-дослідної частини; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2120-3088>; email: valenty93vol@gmail.com.

Voloshchuk Valentyna – PhD, Senior Researcher, Scientific and Research Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2120-3088; e-mail: valenty93vol@gmail.com.

Тимченко Олександр Романович – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0004-6689-6556; e-mail: sasha.timchenko.94@gmail.com.

Tymchenko Oleksandr – postgraduate student, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0004-6689-6556; e-mail: sasha.timchenko.94@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Борисенко О. М., Логвінков С. М., Кривобок Р. В., Лісачук Г. В., Волощук В. В., Тимченко О. Р. Субсолідусна будова системи $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 3 (25). С. 51-56. doi:10.20998/2413-4295.2025.03.06.

Please cite this article as:

Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Lisachuk G., Voloshchuk V., Tymchenko O. Subsolidus structure of the system $\text{BaO} - \text{MgO} - \text{ZrO}_2$. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 3(25), pp. 51–56, doi:10.20998/2413-4295.2025.03.06.

Надійшла (received) 28.08.2025
Прийнята (accepted) 24.09.2025