

УДК 544.31

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09

СУБСОЛІДУСНА БУДОВА СИСТЕМИ $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$

**О. М. БОРИСЕНКО^{*1}, С. М. ЛОГВІНКОВ², Г. М. ШАБАНОВА¹, А. М. КОРОГОДСЬКА³,
М. М. ІВАШУРА⁴, А. А. ІВАШУРА²**

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

² кафедра технологій і безпеки життєдіяльності, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, УКРАЇНА

³ кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

⁴ кафедра неорганічної та фізичної хімії, Національний фармацевтичний університет, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: onborisenko@ukr.net

АНОТАЦІЯ Трикомпонентні системи складають фізико-хімічну основу більшості вогнетривких матеріалів і аналіз їх субсолідусної будови дозволяє досить точно спрогнозувати області складів з оптимальними властивостями, а також дати рекомендації за технологічними параметрами виробництва, спікання та експлуатації одержуваних матеріалів. В результаті проведеного термодинамічного аналізу системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ встановлено, що розбиття системи на елементарні трикутники зазнає змін в двох температурних інтервалах: I – до температури 1141 К та II – вище температури 1141 К. Розрахунковими методами визначені геометро-топологічні характеристики субсолідусної будови системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$: площі елементарних трикутників, ступінь їх асиметрії, площа областей, в яких існують фази, ймовірність існування фаз в системі. Встановлено, що у всьому інтервалі температур існує досить протяжна концентраційна область шпінельних фаз: герцинит (FeAl_2O_4) – благородна шпінель (MgAl_2O_4). Причому, периклаз (MgO) співіснує одночасно з обома шпінелями лише в низькотемпературній області. Це вказує, що під час отримання периклазошпінельних вогнетривів з підвищеною термостійкістю важливим технологічним параметром є швидкість охолодження нижче 1141 К. Для отримання периклазошпінельних вогнетривів з розгалуженою мікродіффузією структурою за рахунок відмінностей коефіцієнтів термічного розширення периклаза, герцинита й благородної шпінелі, – найбільш раціональна концентраційна область досліджуваної системи, що є спільною для двох елементарних трикутників ($\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ і $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$), які існують в різних температурних інтервалах. При високих температурах випалу елементарний трикутник $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ має максимальну площу і мінімальний ступінь асиметрії, а при охолодженні утворюється $\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ – досить значна за площею, але має високу ступінь асиметрії. Тому прогнозувати склади шихт для периклазошпінельних вогнетривів слід з високою точністю дозування і зі значним часом гомогенізації компонентів при змішуванні, так як концентраційна область спільна для обох вище зазначених елементарних трикутників значно скорочується. Таким чином, розбиття системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ на елементарні трикутники і аналіз геометро-топологічних характеристик фаз системи дозволило вибрати в досліджуваній системі області складів, що володіють оптимальними властивостями для отримання шпінельвміщуючих матеріалів

Ключові слова: трикомпонентна система; субсолідусна будова; коннода; елементарний трикутник; геометро-топологічні характеристики; благородна шпінель; герцинит

SUBSOLIDUS STRUCTURE OF THE $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ SYSTEM

**O. BORYSENKO^{1*}, S. LOGVINKOV², G. SHABANOVA¹, A. KOROHODSKA¹, M. IVASHURA³,
A. IVASHURA²**

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

² Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, UKRAINE

³ Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

⁴ Department of Inorganic and Physical Chemistry, National University of Pharmacy, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Three-component systems constitute the physicochemical basis of most refractory materials and the analysis of their subsolidus structure makes it possible to accurately predict the areas of compositions with optimal properties, as well as give recommendations on the technological parameters of production, sintering, and operation of the materials obtained. As a result of the carried out thermodynamic analysis of the $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ system, it was found that the partition of the system into elementary triangles undergoes changes in two temperature ranges: I – up to a temperature of 1141 K and II – above a temperature of 1141 K. By calculation methods, the geometrical-topological characteristics of the subsolidus structure of the system are determined $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$: areas of elementary triangles, degree of their asymmetry, area of regions in which phases exist, probability of phase existence in the system. It has been established that, over the entire temperature range, there is a fairly extended concentration region of spinel phases: hercynite (FeAl_2O_4) – noble spinel (MgAl_2O_4). Moreover, periclase (MgO) coexists

simultaneously with both spinels only in the low-temperature region. This indicates that when obtaining periclase-spinel refractories with increased heat resistance, an important technological parameter is a cooling rate below 1141 K. To obtain periclase-spinel refractories with branched microcracking of the structure due to differences in the thermal expansion coefficients of periclase, hercynite and noble spinel, the most rational concentration region of the system under study is which is common for two elementary triangles ($\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ and $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$) existing in different temperature ranges. At high firing temperatures, the elementary triangle $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ has a maximum area and a minimum degree of asymmetry, and upon cooling, $\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ is formed, which is quite large in area, but has a high degree of asymmetry. Therefore, the composition of the charge for periclase-spinel refractories should be predicted with a high dosage accuracy and with a significant homogenization time of the components during mixing, since the concentration region common for both of the above elementary triangles is significantly reduced. Thus, the division of the $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ system into elementary triangles and the analysis of the geometrical-topological characteristics of the phases of the system made it possible to select in the system under study the range of compositions with optimal properties for obtaining spinel-containing materials.

Keywords: three-component system; subsolidus structure; connod; elementary triangle; geometrical-topological characteristics; noble spinel; hercynite

Вступ

В технології вогнетривів визначальною стадією виробництва є твердофазне спікання, що обумовлює особливу значущість інформації щодо субсолідусної будови діаграм стану фізико-хімічних систем, представлених набором компонентів відповідно до планованого фазового складу матеріалу [1]. Трикомпонентні системи складають фізико-хімічну основу більшості вогнетривких матеріалів і аналіз їх субсолідусної будови дозволяє досить точно спрогнозувати області складів з оптимальними властивостями, а також дати рекомендації щодо технологічних параметрів виробництва, спікання і експлуатації одержуваних матеріалів.

Бінарні системи, що входять до складу системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ вивчені доволі повно. В системі $\text{MgO} - \text{FeO}$ утворюється безперервний ряд твердих розчинів, бінарних оксидних сполук не існує [2]. В системі $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ магнезійна шпінель (MgAl_2O_4) є єдиною стабільною сполукою [3]. В системі $\text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ єдиною стабільною сполукою є герцинит (алюмозалізиста шпінель – FeAl_2O_4) [4].

Систему $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ найчастіше описують у складі різних багатокомпонентних систем, наприклад, автори [5-8]. В роботі [9] запропоновано субсолідусну будову системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, але без пояснень.

Поеднання різних типів шпінелей в складі вогнетрива, алюмозалізистої та алюомагнезійної, сприяє більш інтенсивному утворенню рівномірної павутинної мікропористої структури за рахунок різного термічного розширення цих шпінелей, і як наслідок підвищення його стійкості до одночасного впливу високотемпературних і механічних навантажень [10,11].

Мета роботи

Мета роботи – визначення розрахунковими методами геометро-топологічних характеристик субсолідусної будови системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, їх аналіз і застосування в прогнозуванні раціональних концентраційних областей одержання периклазо-шпінельних вогнетривів з високою термостійкістю.

Виклад основного матеріалу

В результаті проведеного термодинамічного аналізу системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ за методикою [12], авторами встановлено, що розбиття системи на елементарні трикутники зазнає змін у двох температурних інтервалах [13,14]:

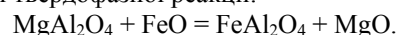
I – до температури 1141 К співіснують такі комбінації фаз: $\text{MgO} - \text{FeO}$, $\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4$, $\text{FeO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4$, $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$, $\text{MgO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$, $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Система розбивається на три елементарних трикутника: 1) $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4$, 2) $\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$, 3) $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$;

II – вище температури 1141 К йде перебудова коннод: зникає коннода $\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4$ і з'являється – $\text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$, що вносить відповідні зміни до розділення системи на елементарні трикутники: 1) $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$, 2) $\text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeAl}_2\text{O}_4$, 3) $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Результати розбиття системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ на елементарні трикутники відповідає правилу Курнакова [3]: $X_I = 1 + 2 = 3$, $X_{II} = 1 + 2 = 3$.

Для характеристики субсолідусної будови системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ проведений розрахунок довжин коннод, результати якого представлені в табл. 1.

З результатів табл. 1 видно, що у всьому інтервалі температур існує досить протяжна концентраційна область шпінельних фаз: герцинит (FeAl_2O_4) – благородна шпінель (MgAl_2O_4). Причому, периклаз (MgO) співіснує одночасно з обома шпінелями лише в низькотемпературній області. Це вказує, що при отриманні периклазошпінельних вогнетривів з підвищеною термостійкістю важливим технологічним параметром є швидкість охолодження нижче температур 1141 К, яка припускає розвиток оборотної твердофазної реакції:



При цьому слід вжити заходів, що запобігають легкому окисненню в'юстіта (F) в гематит (F') зі значним збільшенням об'єму, тобто в вихідній шихті весь FeO повинен знаходитися в заздалегідь синтезованих фазах: у вигляді твердого розчину в'юстіта в периклазі або у вигляді герцинита.

Таблиця 1 – Довжини коннод системи

№	Позначення коноди	L, %
до температури 1141 К		
1	MgO – FeO	1000
2	MgO – FeAl ₂ O ₄	870
3	MgO – MgAl ₂ O ₄	719
4	FeO – FeAl ₂ O ₄	586
5	FeAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃	414
6	FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄	366
7	MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃	281
вище температури 1141 К		
1	MgO – FeO	1000
2	FeO – MgAl ₂ O ₄	893
3	MgO – MgAl ₂ O ₄	719
4	FeO – FeAl ₂ O ₄	586
5	FeAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃	414
6	MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃	281
7	MgAl ₂ O ₄ – FeAl ₂ O ₄	165

Основні геометро-топологічні характеристики субсолідної будови системи та її фаз: площі елементарних трикутників, ступінь їх асиметрії ($L_{\max}$ / $L_{\min}$), площа областей, в яких існують фази, ймовірність існування фаз, наведені в табл. 2, 3. Розрахунки виконані за методикою [9].

Таблиця 2 – Характеристика елементарних трикутників системи MgO – FeO – Al₂O₃

№	Елементарний трикутник	Площа, %	Ступінь асиметрії
до температури 1141 К			
1	MgO – FeO – FeAl ₂ O ₄	586	1,706
2	MgO – FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄	298	2,377
3	FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃	116	1,473
Σ		1000	–
max		586	2,377
min		116	1,473
вище температури 1141 К			
1	MgO – FeO – MgAl ₂ O ₄	719	1,390
2	FeO – MgAl ₂ O ₄ – FeAl ₂ O ₄	165	2,440
3	FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃	116	1,473
Σ		1000	–
max		719	2,440
min		116	1,39

Аналіз отриманих результатів показав, що до температури 1141 К найбільшу площу має елементарний трикутник MgO – FeO – FeAl₂O₄, менша площа у елементарного трикутника MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ і у нього відзначається найбільша ступінь асиметрії (табл. 2). Найменшу площу має трикутник FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – Al₂O₃, але у нього і

найменший ступінь асиметрії. До 1141 К герцинит FeAl₂O₄ має найбільшу ймовірність існування (0,333), який присутній у всіх елементарних трикутниках досліджуваної системи (табл. 3).

Таблиця 3 – Геометро-топологічні характеристики фаз системи

Сполука	Зі скількома фазами співіснує	У скількох трикутниках існує	Площа існування, S _b , %	Ймовірність існування, ω
до температури 1141 К				
MgO	3	2	884	0,295
Al ₂ O ₃	2	1	116	0,039
FeO	2	1	586	0,195
FeAl ₂ O ₄	4	3	1000	0,333
MgAl ₂ O ₄	3	2	414	0,138
Σ			3000	1
max			1000	0,333
min			116	0,039
вище температури 1141 К				
MgO	2	1	719	0,239
Al ₂ O ₃	2	1	116	0,039
FeO	3	2	884	0,295
FeAl ₂ O ₄	3	2	281	0,094
MgAl ₂ O ₄	4	3	1000	0,333
Σ			3000	1,000
max			1000	0,333
min			116	0,039

Вище температури 1141 К в результаті перебудови коннод змінюється розбиття системи на елементарні трикутники, при якому найбільшу площу має трикутник MgO – FeO – MgAl₂O₄ і найменший ступінь асиметрії. Елементарні трикутники FeO – MgAl₂O₄ – FeAl₂O₄ і FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – Al₂O₃ (0,165 і 0,116 відповідно) приблизно рівні за площею, але елементарний трикутник FeO – MgAl₂O₄ – FeAl₂O₄ має найбільший ступінь асиметрії (табл. 2). Тут найбільшу ймовірність існування (0,333) має алюмомагнезійна шпінель (MgAl₂O₄), яка присутня у всіх елементарних трикутниках системи (табл. 3).

Найбільш раціональною концентраційною областю досліджуваної системи для отримання периклазошпінельних вогнетривів з розгалуженою мікротріщинуватою структурою за рахунок відмінностей коефіцієнтів термічного розширення периклаза, герцинита та благородної шпінелі – є область, яка спільна для двох елементарних трикутників (MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ і MgO – FeO – MgAl₂O₄), існуючих в різних температурних інтервалах. При високих температурах випалу елементарний трикутник MgO – FeO – MgAl₂O₄ має максимальну площу і мінімальний ступінь асиметрії, а при охолодженні утворюється MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – досить значна за площею, але має високий ступінь асиметрії. Тому прогнозувати склади шихт для периклазошпінельних вогнетривів слід з високою

точністю дозування і зі значним часом гомогенізації компонентів під час змішування, так як концентраційна область спільна для обох вище зазначених елементарних трикутників значно скорочується.

Висновки

Таким чином, розбиття системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ на елементарні трикутники і аналіз геометро-топологічних характеристик фаз системи дозволило вибрати в досліджуваній системі області складів, що володіють оптимальними властивостями для отримання шпінельовміщуючих матеріалів.

Список літератури

1. Логвинков С. М., Борисенко О. Н., Цапко Н. С., Шабанова Г. Н., Корогодська А. Н., Шумейко В. Н., Гапонова Е. А. Расчетная оценка степени сложности субсолидусного строения трехкомпонентных физико-химических систем. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Химия, химическая технология и экология. Харьков: НТУ «ХПИ», 2020. № 2 (4). С. 57–67. doi: 10.20998/2079-0821.2020.02.08.
2. Самойлова О. В., Макровец Л. А. Термодинамическое моделирование фазовых диаграмм оксидных систем $\text{FeO} - \text{MgO}$, $\text{FeO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{FeO} - \text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2019. Т. 19. № 1. С. 18–25. doi: 10.14529/met190102.
3. Бережной А. С. *Многокомпонентные системы окислов*. К.: Наук. думка, 1970. 544 с.
4. Jak E., Hayes P., Pelton A., Decterov S. Thermodynamic modelling of the $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{PbO} - \text{SiO}_2 - \text{ZnO}$ system with addition of K and Na with metallurgical applications. 2009. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0804/0a0bc1ea0e1f5a0ca22d7b78e3ad3e2a191d.pdf> (дата звернення 15.01.2021).
5. Decterov S. A., Jung I.-H., Jak E., Kang Y.-B., Hayes P., Pelton A. D. Thermodynamic modelling of the $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CoO} - \text{CrO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{NiO} - \text{SiO}_2 - \text{S}$ system and applications in ferrous process metallurgy. *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004. P. 839–850.
6. Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida, Deisi Vieira, Wagner Viana Bielefeldt, Antonio Cesar Faria Vilela. MgO saturation analysis of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ slag system. *Materials Research*. 2018. № 21 (1). P. e20170041. doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0041.
7. Питак Я. Н., Песчанская В. В., Питак О. Я., Юзенко Н. А., Дубовис В. Г. Строение системы $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ в области субсолидуса. *Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. 2013. № 113. С. 65–70.
8. Lv X.-M., Lv X.-W., Wang L.-W., Qiu J., Liu M. Viscosity and structure evolution of the $\text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{FeO} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ slag in ferronickel smelting process from laterite. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2017. № 53 (2). P. 147–154. doi: 10.2298/JMMB150911002L.
9. Бережной А. С. Физико-химическая характеристика и субсолидусное строение системы $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 -$

- $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. *Сборник трудов УННУ*. 1962. Вып. 6. С. 5–63.
10. Södjé J., Uhlendorf S., Klischat H.-J. Aspects of Elastification Reactions in Basic Cement Kiln Bricks. *Refractories WORLDFORUM*. 2013. Vol. 5. Issue 4. P. 53–62.
11. Geraldo Eduardo Gonçalves, Graziella Rajão Cota Pacheco, Modestino Alves de Moura Brito, Sérgio Luiz Cabral da Silva, Vanessa de Freitas Cunha Lins. Influence of magnesia in the infiltration of magnesia-spinel refractory bricks by different clinkers. *Rev. Esc. Minas*. 2015, Vol. 68. Issue. 4. P. 409–415. doi: 10.1590/0370-44672014680117.
12. Логвинков С. М. *Твердофазные реакции обмена в технологии керамики: монография*. Харьков: ХНЭУ, 2013. 248 с.
13. Борисенко О. М., Логвинков С. М., Остапенко І. А., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Івашура А. А. Термодинамічний аналіз системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. *Фізико-хімічні проблеми в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів. Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 40–41.
14. Борисенко О. М., Логвинков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Остапенко І. А., Івашура А. А. Термодинамічні дослідження в системі $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки: збірник наукових праць*. 2020. № 120. С. 115–119. doi: 10.35857/2663-3566.120.10.

References (transliterated)

1. Logvinkov S. M., Borisenko O. N., Tsapko N. S., Shabanova G. N., Korogodskaya A. N., Shumejko V. N., Gaponova O. O. Raschetnaya otsenka stepeni slozhnosti subsolidusnogo stroeniya trekhkomponentnykh fiziko-khimicheskikh sistem [Calculated evaluation of the degree of subsolidus structure complexity of the physico-chemical three-component systems]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 57–67, doi: 10.20998/2079-0821.2020.02.08.
2. Samoylova O. V., Makrovets L. A. Termodinamicheskoye modelirovaniye fazovykh diagramm oksidnykh sistem $\text{FeO} - \text{MgO}$, $\text{FeO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ i $\text{FeO} - \text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ [Thermodynamic modeling of phase diagrams of oxide systems $\text{FeO} - \text{MgO}$, $\text{FeO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ and $\text{FeO} - \text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, Vol. 19, no. 1, pp. 18–25, doi: 10.14529/met190102.
3. Berezhnoy A. S. *Mnogokomponentnyye sistemy okislov* [Multicomponent oxide systems], Kiyev. Nauk. dumka, 1970, 544 p.
4. Jak E., Hayes P., Pelton A., Decterov S. Thermodynamic modelling of the $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{PbO} - \text{SiO}_2 - \text{ZnO}$ system with addition of K and Na with metallurgical applications, 2009. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0804/0a0bc1ea0e1f5a0ca22d7b78e3ad3e2a191d.pdf> (accessed 15.01.2021).
5. Decterov S. A., Jung I.-H., Jak E., Kang Y.-B., Hayes P., Pelton A. D. Thermodynamic modelling of the $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CoO} - \text{CrO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{NiO} - \text{SiO}_2 - \text{S}$ system and applications in ferrous process metallurgy. *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, pp. 839–850.

6. Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida, Deisi Vieira, Wagner Viana Bielefeldt, Antonio Cesar Faria Vilela. MgO saturation analysis of CaO – SiO₂ – FeO – MgO – Al₂O₃ slag system. *Materials Research*, 2018, no. 21 (1), pp. e20170041, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0041.
7. Pytak Ya. N., Peschanskaya V. V., Pytak O. Ya., Yuzenko N. A., Dubovys V. H. Stroenye systemy CaO – MgO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ v oblasti subsolydusa [The structure of the CaO – MgO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ system in the region of the subsolidus]. *Collection of scientific papers of PJSC "The URIR named after A.S. Berezhnoy"*, 2013, no. 113, pp. 65–70.
8. Lv X.-M., Lv X.-W., Wang L.-W., Qiu J., Liu M. Viscosity and structure evolution of the SiO₂ – MgO – FeO – CaO – Al₂O₃ slag in ferronickel smelting process from laterite. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2017, no. 53 (2), pp. 147–154, doi: 10.2298/JMMB150911002L.
9. Berezhnoy A. S. Fiziko-khimicheskaya kharakteristika i subsolidusnoye stroeniye sistemy MgO – FeO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ [Physico-chemical characteristics and subsolidus structure of MgO – FeO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ system]. *Sbornik trudov UNIO [Proceedings of the UNIO]*, 1962, Vol. 6, pp. 5–63.
10. Södje J., Uhlendorf S., Klischat H.-J. Aspects of Elastification Reactions in Basic Cement Kiln Bricks. *Refractories WORLDFORUM*, 2013, no. 5 (4), pp. 53–62.
11. Geraldo Eduardo Gonçalves, Graziella Rajão Cota Pacheco, Modestino Alves de Moura Brito, Sérgio Luiz Cabral da Silva, Vanessa de Freitas Cunha Lins. Influence of magnesia in the infiltration of magnesia-spinel refractory bricks by different clinkers. *Rev. Esc. Minas*, 2015, no. 68 (4), pp. 409–415, doi: 10.1590/0370-44672014680117.
12. Logvinkov S. M. Tverdogaznyye reaktsii obmena v tekhnologii keramiki: monografiya [Solid-phase exchange reactions in ceramics technology: monograph], Kharkiv. KhNUE, 2013, 248 p.
13. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Ostapenko I. A., Shabanova H. M., Korogodskaya A. M., Ivashura A. A. Termodynamichnyy analiz systemy MgO – FeO – Al₂O₃ [Thermodynamic analysis of the system MgO – FeO – Al₂O₃]. *Fiziko-khimichni problemy v tekhnolohiyi tuhoplavkykh nemetalevykh i sylikatnykh materialiv. Tezy dopovidey Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Physico-chemical problems in the technology of refractory non-metallic and silicate materials. Abstracts of reports of the International scientific and technical conference], Kharkiv. DISA PLYUS, 2020, pp. 40–41.
14. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Korogodskaya A. M., Ostapenko I. A., Ivashura A. A. Termodynamichni doslidzhennya v systemi MgO – FeO – Al₂O₃ [Thermodynamic studies in the MgO – FeO – Al₂O₃ system]. *Scientific research on refractories and technical ceramics: collection of scientific papers*, 2020, no. 120, pp. 115–119, doi: 10.35857/2663-3566.120.10.

Відомості про авторів (About authors)

Борисенко Оксана Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Oksana Borysenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Doctoral Candidate, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Логвінков Сергій Михайлович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, професор кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Sergey Logvinkov – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Officer, Professor, Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Шабанова Галина Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>; e-mail: gala-shabanova@ukr.net.

Galina Shabanova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>; e-mail: gala-shabanova@ukr.net.

Корогодська Алла Миколаївна – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної та неорганічної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>; e-mail: all-korogodskaya@ukr.net.

Alla Korogodskaya – Doctor of Technical Sciences, Docent, Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>; e-mail: all-korogodskaya@ukr.net.

Івашюра Марина Миколаївна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Національний фармацевтичний університет, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3427-6024>; e-mail: ivashuramari@gmail.com.

Marina Ivashura – Candidate of Agricultural Sciences (Ph. D.), Docent, Docent, Department of Inorganic and Physical Chemistry, National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3427-6024>; e-mail: ivashuramari@gmail.com.

Івашюра Андрій Анатолійович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0022-7489>; e-mail: ivashura.a@ukr.net.

Andrii Ivashura – Candidate of Agricultural Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0022-7489>; e-mail: ivashura.a@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Борисенко О. М., Логвинков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Івашура М. М., Івашура А. А. Субсолидусна будова системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 59-64. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

Please cite this article as:

Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Korohodska A., Ivashura M., Ivashura A. Subsolidus structure of the $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 59-64, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Борисенко О. Н., Логвинков С. М., Шабанова Г. Н., Корогодская А. Н., Ивашура М. Н., Ивашура А. А. Субсолидусное строение системы $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 59-64. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

АННОТАЦІЯ Трехкомпонентные системы составляют физико-химическую основу большинства огнеупорных материалов и анализ их субсолидусного строения позволяет достаточно точно спрогнозировать области составов с оптимальными свойствами, а также дать рекомендации по технологическим параметрам производства, спекания и эксплуатации получаемых материалов. В результате проведенного термодинамического анализа системы $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ установлено, что разбиение системы на элементарные треугольники претерпевает изменения в двух температурных интервалах: I – до температуры 1141 К и II – выше температуры 1141 К. Расчетными методами определены геометро-топологические характеристики субсолидусного строения системы $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$: площади элементарных треугольников, степень их асимметрии, площадь областей, в которых существуют фазы, вероятность существования фаз в системе. Установлено, что во всем интервале температур существует достаточно протяженная концентрационная область шпинельных фаз: герцинит (FeAl_2O_4) – благородная шпинель (MgAl_2O_4). Причем, периклаз (MgO) сосуществует одновременно с обоими шпинелями лишь в низкотемпературной области. Это указывает, что при получении периклазошпинельных огнеупоров с повышенной термостойкостью важным технологическим параметром является скорость охлаждения ниже 1141 К. Для получения периклазошпинельных огнеупоров с разветвленной микротрещиноватостью структуры за счет различий коэффициентов термического расширения периклаза, герцинита и благородной шпинели, – наиболее рациональная концентрационная область исследуемой системы, являющаяся совместной для двух элементарных треугольников ($\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ и $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$), существующих в различных температурных интервалах. При высоких температурах обжига элементарный треугольник $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ имеет максимальную площадь и минимальную степень асимметрии, а при охлаждении образуется $\text{MgO} - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ – достаточно значительный по площади, но имеющий высокую степень асимметрии. Поэтому прогнозировать составы шихт для периклазошпинельных огнеупоров следует с высокой точностью дозирования и со значительным временем гомогенизации компонентов при смешении, так как концентрационная область совместная для обоих выше отмеченных элементарных треугольников значительно сокращается. Таким образом, разбиение системы $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ на элементарные треугольники и анализ геометро-топологических характеристик фаз системы позволило выбрать в изучаемой системе области составов, обладающих оптимальными свойствами для получения шпинельсодержащих материалов.

Ключевые слова: трехкомпонентная система; субсолидусное строение; коннода; элементарный треугольник; геометро-топологические характеристики; благородная шпинель; герцинит

Надійшла (received) 10.02.2021