

О. М. БОРИСЕНКО, С. М. ЛОГВИНКОВ, Г. М. ШАБАНОВА, І. А. ОСТАПЕНКО, В. М. ШУМЕЙКО

ГЕОМЕТРО–ТОПОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБСОЛІДУСНОЇ БУДОВИ СИСТЕМИ $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$

Серед матеріалів, що привертають велику увагу з точки зору створення вогнетривких виробів з підвищеною термостійкістю можна виділити матеріали на основі композицій системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$. В результаті проведеного термодинамічного аналізу системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ встановлено, що розбиття системи на елементарні трикутники зазнає змін у трьох температурних інтервалах: I – до температури 1537 К, II – в температурному інтервалі 1537 – 2076 К та вище температури 2076 К. Встановлено, що до температури 2076 К існує концентраційна область шпінельних фаз: алюмомагнезійна шпінель – кванділіт. Вище температури 1537 К існує концентраційна область: тіаліт – карроїт, яка відповідає вимогам до матеріалів з високою термостійкістю. Елементарний трикутник $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$ можна використовувати для отримання термостійких матеріалів на основі Al_2TiO_5 стабілізованого MgTi_2O_5 . Для отримання термостійких периклазошпінельних матеріалів рекомендовано елементарний трикутник $\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgO}$, у якому присутні лише сполуки з кубічною кристалічною решіткою. Таким чином, розбиття системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ на елементарні трикутники і аналіз геометро–топологічних характеристик фаз системи дозволило вибрати в досліджуваній системі області складів, що володіють оптимальними властивостями для отримання матеріалів з заданими оптимальними властивостями.

Ключові слова: трикомпонентна система; субсолідусна будова; коннода; елементарний трикутник; геометро–топологічні характеристики; тіаліт, карроїт, алюмомагнезійна шпінель; кванділіт.

О. Н. БОРИСЕНКО, С. М. ЛОГВИНКОВ, Г. Н. ШАБАНОВА, И. А. ОСТАПЕНКО, В. Н. ШУМЕЙКО

ГЕОМЕТРО–ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБСОЛИДУСНОГО СТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$

Среди материалов, которые привлекают внимание с точки зрения создания огнеупорных изделий с повышенной термостойкостью, можно выделить материалы на основе композиций системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$. В результате проведенного термодинамического анализа системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ установлено, что разбиение системы на элементарные треугольники изменится в трех температурных интервалах: I – до температуры 1537 К, II – в температурном интервале 1537 – 2076 К и выше температуры 2076 К. Установлено, что до температуры 2076 К существует концентрационная область шпинельных фаз: алюмомагнезиевая шпинель – квандилит. Выше температуры 1537 К существует концентрационный область: титалит – карроит, которая соответствует требованиям к материалам с высокой термостойкостью. Элементарный треугольник $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$ можно использовать для получения термостойких материалов на основе Al_2TiO_5 стабилизированного MgTi_2O_5 . Для получения термостойких периклазошпинельных материалов рекомендуется элементарный треугольник $\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgO}$, в котором присутствуют только соединения с кубической кристаллической решеткой. Таким образом, разбиение системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ на элементарные треугольники и анализ геометро–топологических характеристик фаз системы позволило выбрать в исследуемой системе области составов, которые обладают оптимальными свойствами для получения материалов с заданными оптимальными свойствами.

Ключевые слова: трехкомпонентная система; субсолидусное строение; коннода; элементарный треугольник; геометро–топологические характеристики; титалит; карроит; алюмомагнезиевая шпинель; квандилит.

O. BORYSENKO, S. LOGVINKOV, G. SHABANOVA, I. OSTAPENKO, V. SHUMEJKO

GEOMETRICAL–TOPOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SUBSOLIDUS STRUCTURE IN THE $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ SYSTEM

Among the materials that attract attention from the point of view of creating refractory products with increased heat resistance, one can single out materials based on compositions of the $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ system. As a result of the thermodynamic analysis of the $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ system, it was found that the partition of the system into elementary triangles will change in three temperature ranges: I – up to 1537 K, II – in the temperature range 1537 – 2076 K and above 2076 K. It has been established that up to a temperature of 2076 K there is a concentration range of spinel phases: magnesium aluminate spinel – quandykite. Above 1537 K, there is a concentration range: tialite – karroite, which meets the requirements for materials with high heat resistance. The elementary triangle $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$ can be used to obtain heat-resistant materials based on Al_2TiO_5 stabilized by MgTi_2O_5 . To obtain heat-resistant periclase–spinel materials, an elementary triangle $\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgO}$ is recommended, in

© О. М. Борисенко, С. М. Логвінков, Г. М. Шабанова, та ін., 2021

which only compounds with a cubic crystal lattice are present. Thus, the division of the MgO – Al₂O₃ – TiO₂ 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 regions of compositions that have optimal properties for obtaining materials with the specified optimal properties.

Keywords: three–component system; subsolidus structure; connod; elementary triangle; geometrical–topological characteristics; tialite; karroite; magnesium aluminate spinel; quandilite.

Вступ. Одним з найважливіших показників високотемпературних матеріалів є термостійкість, яка характеризує здатність виробів протистояти виникаючим термічним напруженням в результаті теплових впливів. Підвищення термостійкості відомих і пошук нових термостійких вогнетривких матеріалів залишається актуальною проблемою.

Серед матеріалів, що привертають велику увагу з точки зору створення вогнетривких виробів з підвищеною термостійкістю можна виділити матеріали на основі композицій системи MgO – Al₂O₃ – TiO₂.

Цінним компонентом системи є титанат алюмінію Al₂TiO₅ (тіаліт), який має високу температуру плавлення, високу хімічну стійкість до кислого середовища і силікатних розплавів, негативний в широкому діапазоні температур низький температурний коефіцієнт лінійного розширення [1–4].

Однак титанат алюмінію володіє вираженою анізотропією температурного коефіцієнта лінійного розширення в напрямку кристалографічних вісей і внаслідок цього отримання міцних виробів у спеченому стані на його основі ускладнено через виникнення механічної напруги і утворення мікротріщин під час охолодження. Ще однією причиною, що обмежує застосування титанату алюмінію є його нестабільність при тривалій експлуатації в інтервалі температур 1023 – 1473 К, що призводить до його розпаду на вихідні оксиди. Відомо [5, 6], що при використанні добавок, що утворюють з титанатом алюмінію тверді розчини або сполуки, наприклад, MgTi₂O₅ (карроїт), який має псевдобрукітову структуру, спостерігається тенденція до збільшення стабільності тіаліту.

Ще одна важлива сполука, що входить до складу системи MgO – Al₂O₃ – TiO₂ – це алюмо–магнезійна шпінель (MgAl₂O₄), на основі якої розроблюються матеріали з високою механічною міцністю, високою корозійною та радіаційною стійкістю. Також значний інтерес представляють шпінельні тверді розчини MgAl₂O₄ – Mg₂TiO₄ [7–9] для розробки сучасних матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками. Кванділіт Mg₂TiO₄ має структуру типу шпінелі.

Крім тіаліту, карроїту, алюмогнезійної шпінелі та кванділіту система MgO – Al₂O₃ – TiO₂ містить

термодинамічно стабільні фази: титанат магнію MgTiO₃ (гейкеліт) та Al₄TiO₈, яка за даними [10] імовірно утворюється вище 2076 К під час взаємодії Al₂O₃ та Al₂TiO₅, стабільна в дуже вузькому інтервалі температур і розкладається за температури 2114 К.

Мета роботи. Визначення на основі аналізу геометро–топологічних характеристик субсолідусної будови системи MgO – Al₂O₃ – TiO₂ раціональних концентраційних областей одержання термостійких матеріалів.

Виклад основного матеріалу. За методикою [11] авторами проведено термодинамічний аналіз системи MgO – Al₂O₃ – TiO₂ та встановлено, що розбиття системи на елементарні трикутники зазнає змін у трьох температурних інтервалах:

I – до температури 1537 К термодинамічно стабільними є сполуки: Al₂O₃, TiO₂, MgO, MgTi₂O₅, MgTiO₃, Mg₂TiO₄, MgAl₂O₄; співіснують такі комбінації фаз: Al₂O₃ – TiO₂ (1000), Al₂O₃ – MgTi₂O₅ (917), MgTiO₃ – Al₂O₃ (882), Al₂O₃ – MgAl₂O₄ (719), MgAl₂O₄ – MgTiO₃ (694), MgAl₂O₄ – Mg₂TiO₄ (638), Mg₂TiO₄ – MgO (500), MgAl₂O₄ – MgO (281), TiO₂ – MgTi₂O₅ (200), MgTiO₃ – Mg₂TiO₄ (167), MgTi₂O₅ – MgTiO₃ (133), в дужках зазначені довжини коннод (L, %); система розбивається на п'ять елементарних трикутників: 1) Al₂O₃ – TiO₂ – MgTi₂O₅, 2) Al₂O₃ – MgTi₂O₅ – MgTiO₃, 3) Al₂O₃ – MgAl₂O₄ – MgTiO₃, 4) MgTiO₃ – MgAl₂O₄ – Mg₂TiO₄, 5) Mg₂TiO₄ – MgAl₂O₄ – MgO;

II – в інтервалі температур 1537 – 2076 К: вище температури 1537 К з'являється ще одна термодинамічно стабільна сполука тіаліт (Al₂TiO₅), яка вносить корективи до перебудови коннод у системі – співіснують такі комбінації фаз: MgTiO₃ – Al₂O₃ (882), Al₂O₃ – MgAl₂O₄ (719), MgTiO₃ – MgAl₂O₄ (694), MgAl₂O₄ – Mg₂TiO₄ (638), TiO₂ – Al₂TiO₅ (560), Mg₂TiO₄ – MgO (500), Al₂TiO₅ – MgTi₂O₅ (492), Al₂TiO₅ – MgTiO₃ (488), Al₂TiO₅ – Al₂O₃ (440), MgAl₂O₄ – MgO (281), TiO₂ – MgTi₂O₅ (200), MgTiO₃ – Mg₂TiO₄ (167), MgTi₂O₅ – MgTiO₃ (133), в дужках зазначені довжини коннод (L, %); відповідно система розбивається на шість елементарних трикутників: 1) TiO₂ – Al₂TiO₅ – MgTi₂O₅, 2) Al₂TiO₅ – MgTi₂O₅ – MgTiO₃, 3) Al₂TiO₅ – MgTiO₃ – Al₂O₃, 4) Al₂O₃ – MgTiO₃ – MgAl₂O₄, 5)

$\text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$, 6) $\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgO}$;

III – вище температури 2076 К умовно враховуємо сполуку Al_4TiO_8 , яка є термодинамічно стабільною вище даної температури, відповідно до цього йде перебудова коннод системи: $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgO}$ (893), $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ (719), $\text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{Al}_4\text{TiO}_8$ (642), $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$ (638), $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgTiO}_3$ (622), $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5$ (560), $\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgO}$ (500), $\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$ (492), $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ (282), $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_4\text{TiO}_8$ (282), $\text{MgO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ (281), $\text{TiO}_2 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$ (200), $\text{MgTiO}_3 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$ (167), $\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{Al}_4\text{TiO}_8$ (158), $\text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{MgTiO}_3$ (133), в дужках зазначені довжини коннод (L, %); що вносить значні зміни до розділення системи на елементарні трикутники: 1) $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$, 2) $\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{Al}_4\text{TiO}_8$, 3) $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{MgTiO}_3$, 4) $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgTiO}_3 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$, 5) $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgO}$, 6) $\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$, 7) $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$.

Результати розбиття системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ на елементарні трикутники відповідає правилу Курнакова [12]: $X_I = 1 + 4 = 5$, $X_{II} = 1 + 5 = 6$, $X_{III} = 1 + 6 = 7$, де X_i – кількість елементарних трикутників.

З аналізу результатів довжин коннод видно, що до температури 2076 К існує концентраційна область шпінельних фаз: алюмомагнезіальна шпінель – кванділіт ($\text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$). Вище температури 1537 К існує концентраційна область: тіаліт – карроїт ($\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$), яка відповідає вимогам до матеріалів з високою термостійкістю. Вище температури 2076 К фаза Al_4TiO_8 співіснує майже зі всіма фазами системи.

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. № 1, № 2. Розрахунки виконані за методикою [12].

Таблиця 1 – Характеристика елементарних трикутників системи $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$

№	Елементарний трикутник	Площа, %	Ступінь асиметрії
до температури 1537 К			
1	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$	200	5,000
2	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{MgTiO}_3$	133	6,894
3	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgTiO}_3$	187	1,271
4	$\text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	120	4,156
5	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgO}$	360	2,270
Σ		1000	–
max		360	6,894
min		120	1,271
в інтервалі температур 1537 – 2076 К			
1	$\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$	112	2,800
2	$\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{MgTiO}_3$	74	3,699
3	$\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTiO}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$	147	2,005
4	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	187	1,271
5	$\text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	120	4,156
6	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{MgO}$	360	2,270
Σ		1000	–
max		360	4,156
min		74	1,271
вище температури 2076 К			
1	$\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5$	112	2,800
2	$\text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{Al}_4\text{TiO}_8$	32	4,063
3	$\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgTi}_2\text{O}_5 - \text{MgTiO}_3$	95	4,827
4	$\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgTiO}_3 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	120	3,820
5	$\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgO}$	359	1,786
6	$\text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	203	3,178
7	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_4\text{TiO}_8 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	79	2,550
Σ		1000	–
max		359	4,827
min		32	1,786

Аналіз отриманих результатів показав, що до температури 2076 К найбільшу площу має елементарний трикутник $Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4 - MgO$ і у нього відзначається середня ступінь асиметрії (див. табл. № 1). Також алюмагnezіальна шпінель має найбільшу ймовірність існування (0,223). Тому в цій концентраційній області можна прогнозувати склади шихт шпінельвміщуючих вогнетривів з високими експлуатаційними характеристиками. В розглянутому елементарному трикутнику присутні лише сполуки з кубічною кристалічною решіткою, що надає їм ізотропності та, наряду з різницею у термічних коефіцієнтів лінійного розширення, – дозволяє

розраховувати на отримання матеріалів з мікротріщинуватою структурою. Саме така структура потрібна для запобігання розповсюдження тріщин та досягнення високої термостійкості.

До температури 1537 К найменшу площу має елементарний трикутник $MgTiO_3 - MgAl_2O_4 - Mg_2TiO_4$ і високий ступінь асиметрії. В температурному інтервалі 1537 – 2076 К найменшу площу має елементарний трикутник $Al_2TiO_5 - MgTi_2O_5 - MgTiO_3$ і високий ступінь асиметрії. Що вказує на необхідність застосування спеціальних технологічних прийомів масопідготовки для синтезу композиційних матеріалів в цих областях.

Таблиця 2 – Геометро–топологічні характеристики фаз системи

Сполука	Зі скількома фазами співіснує	У скількох трикутниках існує	Площа існування, S_i , %	Ймовірність існування, ω
до температури 1537 К				
Al_2O_3	4	3	520	0,172
TiO_2	2	1	200	0,067
MgO	2	1	360	0,120
$MgTi_2O_5$	3	2	333	0,111
$MgTiO_3$	4	3	440	0,147
Mg_2TiO_4	3	2	480	0,160
$MgAl_2O_4$	4	3	667	0,223
Σ			3000	1,000
max			667	0,223
min			200	0,067
в інтервалі температур 1537 – 2076 К				
Al_2O_3	3	2	334	0,111
TiO_2	2	1	112	0,037
MgO	2	1	360	0,120
$MgTi_2O_5$	3	2	186	0,062
$MgTiO_3$	5	4	528	0,176
Mg_2TiO_4	3	2	480	0,160
$MgAl_2O_4$	4	3	667	0,223
Al_2TiO_5	4	3	333	0,111
Σ			3000	1,000
max			667	0,223
min			112	0,037
вище температури 2076 К				
Al_2O_3	2	1	79	0,026
TiO_2	2	1	112	0,037
MgO	3	2	562	0,187
$MgTi_2O_5$	4	3	239	0,080
$MgTiO_3$	3	2	215	0,072
Mg_2TiO_4	3	2	479	0,160
$MgAl_2O_4$	3	2	282	0,094
Al_4TiO_8	7	6	888	0,296
Al_2TiO_5	3	2	144	0,048
Σ			3000	1,000
max			888	0,296
min			79	0,026

Елементарний трикутник, який привертає увагу, це $TiO_2 - Al_2TiO_5 - MgTi_2O_5$, в температурному інтервалі 1537 – 2076 К має середнє значення площі і доволі низький ступінь асиметрії. Тобто працюючи в цій концентраційній області не потрібно дотримуватися особливих умов синтезу. Цю область можна використовувати для отримання термостійких матеріалів на основі Al_2TiO_5 стабілізованого $MgTi_2O_5$.

Для підвищення термостійкості корундових вогнетривів та композиційних матеріалів за його участю доцільно використовувати область елементарного трикутника $Al_2O_3 - MgTiO_3 - MgAl_2O_4$, у якого середнє значення площі та найменший показник ступеня асиметрії.

Отриманні розрахункові данні вище температури 2076 К, в наслідок не доведення існування сполуки Al_4TiO_8 , мають рекомендований характер та потребують наступних теоретичних та практичних досліджень.

Висновки. Таким чином, розбиття системи $MgO - Al_2O_3 - TiO_2$ на елементарні трикутники і аналіз геометро-топологічних характеристик фаз системи дозволило вибрати в досліджуваній системі області складів, що володіють оптимальними властивостями для отримання матеріалів з заданими оптимальними властивостями.

Список літератури

- Li M., Chen F., Shen Q., Zhang L. Fabrication and thermal properties of Al_2TiO_5/Al_2O_3 composites. *Materials Science–Poland*. 2010. Vol. 28, no. 3. P. 663–670.
- Uribe R., Baudin C. Influence of a dispersion of aluminum titanate particles of controlled size on the thermal shock resistance of alumina. *J. Am. Ceram. Soc.* 2003. Vol. 86 (5). P. 846–850. doi: org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03385.x.
- Moritz K., Aneziris C. G., Hesky D., Gerlach N. Magnesium aluminate spinel ceramics containing aluminum titanate for refractory applications. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2014. Vol. 5, no. 2. P. 125–130. doi: 10.4416/JCST2013-00037.
- Kim H. C., Lee K. S., Kweon O. S., Aneziris G. C., Kim I. J. Crack healing, reopening and thermal expansion behavior of Al_2TiO_5 ceramics at high temperature. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007. Vol. 27. P. 1431–1434. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.024.
- Yousefi M., Alizadeh P., Yekta B., Molaie F., Ghafoorian N., Montazerian M. Synthesis and characterization of diopside glass-ceramic matrix composite reinforced with aluminum titanate. *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. P. 1447–1452. doi: 10.1016/j.ceramit.2008.07.20.
- Chen J. H., Yin L., Feng G., Jiang F., Zhao Q. Q., Lan S. F., Liu M. T., Zhong F. F., Huang Z. Z., Liu J. M., Hu Q., Jiang W. H. Research Progress of Magnesium Stabilized Aluminum Titanate and New Application of It in Pigment. *Journal of Modern Physics*. 2020. Vol. 11. P. 1874–1890. doi: org/10.4236/jmp.2020.111117.
- Petrova M. A., Mikirticheva G. A., Novikova A. S., Popova V. F. Spinel solid solutions in the systems $MgAl_2O_4-ZnAl_2O_4$ and

- $MgAl_2O_4-Mg_2TiO_4$. *Journal of Materials Research*. 1997. Vol. 12 (10). P. 2584–2588. doi: 10.1557/jmr.1997.0343.
- Ono H., Nakajima K., Agawa S., Ibuta T., Maruo R., Usui T. Formation Conditions of Ti_2O_3 , $MgTi_2O_4$, Mg_2TiO_4 , and $MgAl_2O_4$ in Ti–Mg–Al Complex Deoxidation of Molten Iron. *Steel Research International*. 2014. Vol. 86(3). P. 241–251. doi: 10.1002/srin.201400034.
- Рытвин В. М., Перепелицын В. А., Пономаренко А. А., Гильварг С. И. Титаноглиноземистый шлак – полифункциональное техногенное сырье высокоглиноземистого состава. Часть 2. Применение шлака ферротитана для производства огнеупоров в металлургии и других отраслях промышленности. *Новые огнеупоры*. 2017. № 9. С. 16–27.
- Jung In-Ho, Eriksson G., Wu P., Pelton A. Thermodynamic modeling of the $Al_2O_3 - Ti_2O_3 - TiO_2$ system and its applications to the Fe – Al – Ti – O inclusion diagram. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 49 (9). P. 1290–1297. doi: org/10.2355/isijinternational.49.1290.
- Логвинков С. М. *Твердофазные реакции обмена в технологии керамики: монография*. Харьков: ХНЭУ, 2013. 248 с.
- Бережной А. С. *Многокомпонентные системы окислов*. Киев : Наук. думка, 1970. 544 с.

References (transliterated)

- Li M., Chen F., Shen Q., Zhang L. Fabrication and thermal properties of Al_2TiO_5/Al_2O_3 composites. *Materials Science–Poland*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 663–670.
- Uribe R., Baudin C. Influence of a dispersion of aluminum titanate particles of controlled size on the thermal shock resistance of alumina. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2003, vol. 86 (5), pp. 846–850, doi: org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03385.x.
- Moritz K., Aneziris C. G., Hesky D., Gerlach N. Magnesium aluminate spinel ceramics containing aluminum titanate for refractory applications. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 125–130, doi: 10.4416/JCST2013-00037.
- Kim H. C., Lee K. S., Kweon O. S., Aneziris G. C., Kim I. J. Crack healing, reopening and thermal expansion behavior of Al_2TiO_5 ceramics at high temperature. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2007, vol. 27, pp. 1431–1434, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.024.
- Yousefi M., Alizadeh P., Yekta B., Molaie F., Ghafoorian N., Montazerian M. Synthesis and characterization of diopside glass-ceramic matrix composite reinforced with aluminum titanate. *Ceramics International*, 2009, vol. 35, pp. 1447–1452, doi: 10.1016/j.ceramit.2008.07.20.
- Chen J. H., Yin L., Feng G., Jiang F., Zhao Q. Q., Lan S. F., Liu M. T., Zhong F. F., Huang Z. Z., Liu J. M., Hu Q., Jiang W. H. Research Progress of Magnesium Stabilized Aluminum Titanate and New Application of It in Pigment. *Journal of Modern Physics*, 2020, vol. 11, pp. 1874–1890, doi: org/10.4236/jmp.2020.111117.
- Petrova M. A., Mikirticheva G. A., Novikova A. S., Popova V. F. Spinel solid solutions in the systems $MgAl_2O_4-ZnAl_2O_4$ and $MgAl_2O_4-Mg_2TiO_4$. *Journal of Materials Research*, 1997, vol. 12 (10), pp. 2584–2588, doi: 10.1557/jmr.1997.0343.
- Ono H., Nakajima K., Agawa S., Ibuta T., Maruo R., Usui T. Formation Conditions of Ti_2O_3 , $MgTi_2O_4$, Mg_2TiO_4 , and $MgAl_2O_4$ in Ti–Mg–Al Complex Deoxidation of Molten Iron. *Steel Research International*, 2014, vol. 86 (3), pp. 241–251, doi: 10.1002/srin.201400034.
- Rytvin V. M., Perepelitsyn V. A., Ponomarenko A. A., Gil'varg S. I. Titanoglinozemisty shlak – polifunktsional'noye tekhnogennoye

- syr'ye vysokoglinozemistogo sostava. Chast' 2. Primeneniye shlaka ferrotitana dlya proizvodstva ogneuporov v metallurgii i drugih otraslyakh promyshlennosti [Titanium–alumina slag – polyfunctional technogenic raw materials of high–alumina composition. Part 2. The use of ferrotitanium slag for the production of refractories in metallurgy and other industries]. *New refractories*, 2017, no. 9, pp. 16–27.
10. Jung In–Ho, Eriksson G., Wu P., Pelton A. Thermodynamic modeling of the Al_2O_3 – Ti_2O_3 – TiO_2 system and its applications to the Fe–Al–Ti–O inclusion diagram. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 49 (9), pp. 1290–1297, doi: org/10.2355/isijinternational.49.1290.
11. Logvinkov S. M. Tverdogaznyye reaktsii obmena v tekhnologii keramiki: monografiya [Solid–phase exchange reactions in ceramics technology: monograph], Kharkiv: KhNUE, 2013, 248 p.
12. Berezhnoy A. S. Mnogokomponentnyye sistemy okislov [Multi–component oxide systems], Kiyev: Nauk. dumka, 1970, 544 p.

Надійшла (received) 15.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Борисенко Оксана Миколаївна (Борисенко Оксана Николаевна, Borysenko Oksana) – 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.

Логвінков Сергій Михайлович (Логвинков Сергей Михайлович, Logvinkov Sergii) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний економічний університет ім. 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.

Шабанова Галина Миколаївна (Шабанова Галина Николаевна, Shabanova Halyna) – 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.

Остапенко Ігор Анатолійович (Остапенко Игорь Анатольевич, Ostapenko Igor) – кандидат технічних наук, генеральний директор ТОВ «Дружківський вогнетривкий завод», м. Дружківка, Україна.

Шумейко Віта Миколаївна (Шумейко Вита Николаевна, Shumejko Vita) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0567-0946>; e–mail: shum-vita@ukr.net.