

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

ПЕРИКЛАЗОШПИНЕЛЬНІ ВОГНЕТРИВИ МОДИФІКОВАНІ TiO_2

На протязі останніх десятиліть продовжується розвиток та удосконалення вогнетривких матеріалів для футерування високотемпературних зон обертових печей. Основні вимоги, які пред'являють до вогнетривких виробів для футерівки обертових печей для випалу цементного клинкеру: висока щільність та міцність на стик, низька пористість і газопроникненість, підвищена стійкість до стирання, низька теплопровідність, висока корозійна стійкість та здатність до утворення захисного шару. Сьогодні основною метою сучасних дослідників є створення термостійкого вогнетриву з гнучкою структурою, що забезпечує його цілісність за високих температур й механічних навантажень, які мають здатність до утворення захисного шару обмазки. У роботі апробовано технологічний підхід введення до складу сировинної шихти для периклазошпинельних вогнетривів вібромолотого модифікатора (брикет на основі високоглиноземистого компоненту та титанвміщуюча добавка) у вигляді заздалегідь синтезованого продукту, що містить кристалічні фази системи $Al_2O_3 - TiO_2 - FeO$. Основою для виробництва периклазошпинельних вогнетривів модифікованих TiO_2 є чотирикомпонентна систему $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$, на основі термодинамічних розрахунків якої, підбрано вміст окремих компонентів шихти та прогнозовано експлуатаційні характеристики. Показано взаємозв'язок фізико-механічних властивостей з вмістом окремих компонентів у вихідних складах шихт і відзначені напрямки протікання твердофазних процесів з їх участю. Відмічено особливості мікроструктури матеріалу зразка у взаємозв'язку з формуванням оптимального комплексу властивостей. Показано сприятливий для підвищення термостійкості матеріалу характер організації мікропор, що доповнює фазовий механізм адаптації ще і структурним ефектом демпфірування механічних напружень під час термоцикування.

Ключові слова: обертова піч; периклазошпинельні вогнетриви; модифікатор; фізико-механічні властивості; мікроструктура; алюомагнезійальна шпинель; герциніт.

О. Н. БОРИСЕНКО, С. М. ЛОГВИНКОВ, Г. Н. ШАБАНОВА, И. А. ОСТАПЕНКО, Е.А. ГАПОНОВА

ПЕРИКЛАЗОШПИНЕЛЬНЫЕ ОГНЕУПОРЫ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ TiO_2

На протяжении последних десятилетий продолжается развитие и совершенствование огнеупорных материалов для футеровки высокотемпературных зон вращающихся печей. Основные требования, которые предъявляют к огнеупорным изделиям для футеровки вращающихся печей обжига цементного клинкера: высокая плотность и предел прочности на сжатие, низкая пористость и газопроницаемость, повышенная устойчивость к истиранию, низкая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость и способность к образованию защитного слоя. Сегодня основной целью современных исследователей является создание термостойкого огнеупора с гибкой структурой, обеспечивающей его целостность при высоких температурах и механических нагрузках, которые обладают способностью к образованию защитного слоя обмазки. В работе апробирован технологический подход введения в состав сырьевой шихты для периклазошпинельных огнеупоров вибромолотого модификатора (брикет на основе высокоглиноземистого компонента и титансодержащей добавки) в виде заранее синтезированного продукта, содержащего кристаллические фазы системы $Al_2O_3 - TiO_2 - FeO$. Основой для производства периклазошпинельных огнеупоров модифицированных TiO_2 является четырехкомпонентная система $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$, на основе термодинамических расчетов которой, подобрано содержание отдельных компонентов шихты и спрогнозировано эксплуатационные характеристики. Показана взаимосвязь физико-механических свойств с содержанием отдельных компонентов в исходных складах шихты и отмечены направления протекания твердофазных процессов с их участием. Отмечены особенности микроструктуры материала образца во взаимосвязи с формированием оптимального комплекса свойств. Показано благоприятный для повышения термостойкости материала характер организации микропор, дополняющий фазовый механизм адаптации еще и структурным эффектом демпфирования механических напряжений при термоциклировании.

Ключевые слова: вращающаяся печь; периклазошпинельные огнеупоры; модификатор; физико-механические свойства; микроструктура; алюомагнезійальна шпинель; герциніт

O. BORYSENKO, S. LOGVINKOV, G. SHABANOVA, I. OSTAPENKO, O. GAPONOVA

PERICLASE-SPINEL REFRACTORY MODIFIED TiO_2

Over the past decades, the development and improvement of refractory materials for lining high-temperature zones of rotary kilns continues. The main requirements for refractory products for lining rotary kilns for cement clinker roasting are: high density and ultimate compressive strength, low porosity and gas permeability, increased abrasion resistance, low thermal conductivity, high corrosion resistance and the ability to form a protective layer. Today, the main goal of modern researchers is to create a heat-resistant refractory with a flexible structure that ensures its integrity at high temperatures and mechanical loads, which have the ability to form a protective coating layer. In this work, a technological approach has been tested for introducing a vibro-milled modifier (briquette based on a high-alumina component and a titanium-containing additive) into the composition of the raw charge for periclase-spinel refractory in the form of a pre-synthesized product containing crystalline phases of the $Al_2O_3 - TiO_2 - FeO$ system.

© О. М. Борисенко, С. М. Логвінков, Г. М. Шабанова, І. А. Остапенко, О. О. Гапонова, 2021

The basis for the production of periclase-spinel refractories modified with TiO_2 is the four-component system $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO} - \text{TiO}_2$, on the basis of thermodynamic calculations of which the content of individual components of the charge was selected and the operational characteristics were predicted. The interrelation of physical and mechanical properties with the content of individual components in the initial charge warehouses is shown, and the directions of solid-phase processes with their participation are noted. The features of the microstructure of the sample material are noted in relation to the formation of an optimal set of properties. It is shown that the nature of the organization of micropores is favorable for increasing the thermal stability of the material, which complements the phase adaptation mechanism also with the structural effect of damping mechanical stresses during thermal cycling.

Keywords: rotary kiln; periclase-spinel refractory; modifier; physical and mechanical properties; microstructure; magnesium-alumina spinel; hercynite.

Вступ. Випал цементного клінкеру в обертових печах є однією з основних технологічних операцій під час виробництва портландцементу. Обертובה піч включає наступні зони: вхідна (підігріву), декарбонізації, верхню перехідну, випалу, нижню перехідну (охолодження) [1-3]. В зоні випалу спостерігається найвища температура й найжорстокіші умови експлуатації вогнетривів, які зазнають впливу не тільки високих температур але й хімічній корозії з боку цементного клінкеру, структурним навантаженням, ушкодженням у результаті розтріскування і відшарування та інше [4, 5].

На протязі останніх десятиліть продовжується розвиток та удосконалення вогнетривких матеріалів для футерування високотемпературних зон обертових печей, що пов'язано зі змінами в технології виробництва цементу, введенням нових технічних рішень, заміна традиційного палива на альтернативне, а також з екологічними проблемами.

В якості основного компоненту вогнетривів для футерівки цементних печей використовують сировину на основі MgO . Оксид магнію має високу температуру плавлення, високу стійкість до лужних флюсів та шлаків. Периклаз у поєднанні зі шпінелями у складі вогнетриву має підвищені термічні та фізико-механічні властивості [6, 7].

Основні вимоги, які пред'являють до вогнетривких виробів для футерівки обертових печей для випалу цементного клінкеру: висока щільність та міцність на стик, низька пористість і газопроникненість, підвищена стійкість до стирання, низька теплопровідність, висока корозійна стійкість та здатність до утворення гарнісажу.

Сьогодні основною метою сучасних дослідників є створення термостійкого вогнетриву з гнучкою структурою, що забезпечує його цілісність за високих температур й механічних навантажень, які мають здатність до утворення захисного шару обмазки.

Мета роботи. Розробка складів периклазошпінельних вогнетривів модифікованих TiO_2 , які мають гнучку структуру, що адаптується до температурних та механічних навантажень.

Виклад основного матеріалу.

Для проведення досліджень використовували наступні сировинні матеріали: периклаз П-92 різних фракцій, синтезовану шпінель с надлишком Al_2O_3 (вміст $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 74$ мас. %), високоглиноземистий компонент (вміст $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 96$ мас. %), титанвміщуючу добавку (вміст $\text{TiO}_2 \geq 63$ мас. %) та тимчасове зв'язуюче. Попередньо були виготовлені брикети на основі високоглиноземистого компоненту та титанвміщуючої добавки та випалені за температури 1540°C . Склади шихт наведено у табл. 1. Фракційний склад периклазу однаковий у всіх варіантах шихт (мм): 3 – 1, 1 – 0 та < 0,063 (вібропомел). Основним компонентом високоглиноземистого компоненту є Al_2O_3 , а титанвміщуючої добавки – TiO_2 та FeO . Тобто хімічну взаємодію між цими компонентами можна розглянути як трикомпонентну систему $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - \text{FeO}$. В двокомпонентній системі $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ стабільною сполукою вище 1537 K є тіаліт (Al_2TiO_5) [8, 9], який має негативний в широкому діапазоні температур низький температурний коефіцієнт лінійного розширення, високу температуру плавлення, високу хімічну стійкість до кислого середовища і силікатних розплавів, але його нестабільність під час тривалої експлуатації в інтервалі температур $1023 - 1473\text{ K}$ обмежує його застосування [10, 11]. Герцініт (FeAl_2O_4) єдина стабільна сполука системи $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO}$ [12, 13], яка надає виробам структурну гнучкість, що дозволяє їм протистояти розтріскуванню і відшаруванню робочої поверхні в результаті термічних і механічних навантажень в службі, а також хорошу здатність утворювати обмазку – гарнісаж (захисне покриття футерування) [14]. У двокомпонентній системі $\text{FeO} - \text{TiO}_2$ стабільними є три сполуки: ульвошпінель (Fe_2TiO_4), ільменіт (FeTiO_3) і псевдобрукіт (FeTi_2O_5) [15, 16]. Псевдобрукіт стабільний вище температури 1413 K . Таким чином, під час варіювання кількістю високоглиноземистого компоненту та титанвміщуючої добавки за допомогою термодинамічних розрахунків [17], можна отримати брикет певного складу. В даному дослідженні авторів цікавлять матеріали шпінельної структури.

Фізико-механічні властивості зразків визначали відповідно до стандартних методик: відкриту поруватість, уявну щільність за ДСТУ ISO 5017:2014, межу міцності на стиск за ДСТУ EN ISO 8895:2018 (EN ISO 8895:2006, IDT; ISO 8895:2004, IDT). Мікроструктуру зразків вивчали за допомогою мікроскопу Digital Microscope S10 1000x (збільшення 1000).

Фізико-механічні властивості випалених зразків наведено в табл. 2. Мікроструктура периклазошпінельних зразків представлена на рис. 1.

Відповідно до табл. 2 при збільшенні у брикеті високоглиноземистого компоненту уявна щільність периклазошпінельних зразків знижується, а межа міцності на стиск підвищуються. У зразках № 4 – 6, де використовували суміш різних брикетів, уявна щільність майже не змінюється, та знаходиться на рівні зразка № 3. Межа міцності на стиск збільшується зі збільшенням вмісту високоглиноземистого компоненту у брикеті, але вона нижча, ніж у зразка № 3.

Таблиця 1 – Склади шихт периклазошпінельних вогнетривів модифікованих TiO_2

Сировинні матеріали	Номер шихти					
	1	2	3	4	5	6
Периклаз	Основа	Основа	Основа	Основа	Основа	Основа
Шпінель (вібропомел)	+	+	+	+	+	+
Брикет (вібропомел) (співвідношення високоглиноземистого компоненту до титанвміщуючої добавки):						
3 : 1	+			+	+	+
4 : 1		+		+		+
5,6 : 1			+		+	+
Тимчасове зв'язуючі (зверх 100 %)	+	+	+	+	+	+

Таблиця 2 – Властивості периклазошпінельних вогнетривів модифікованих TiO_2

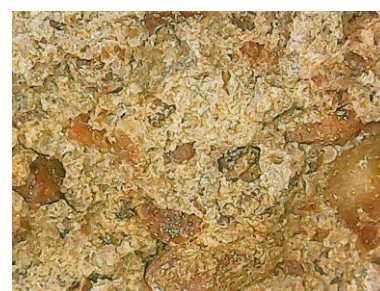
Властивості	Номер шихти					
	1	2	3	4	5	6
Уявна щільність, г/см ³	3,23	3,16	3,11	3,15	3,11	3,14
Відкрита поруватість, %	18,1	19,2	15,9	16,6	17,2	18,0
Межа міцності на стиск, Н/мм ²	29,8	35,5	48,4	31,6	39,1	39,1
Термостійкість 1300 °С – вода, тепломзмін до руйнування	10	10	10	10	10	10



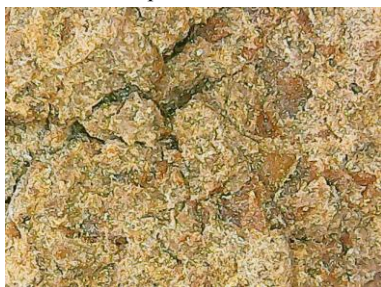
зразок № 1



зразок № 2



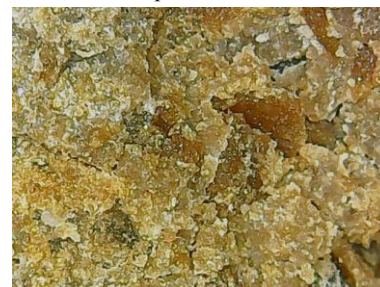
зразок № 3



зразок № 4



зразок № 5



зразок № 6

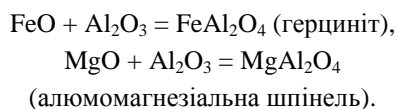
Рисунок 1 – Мікроструктура периклазошпінельних зразків модифікованих TiO_2

Мікроструктура зразків № 1 і № 4 більш щільна, але пори ізольовані та навіть агрегують у форми протяжних тріщин. У зразках № 2, 5, 6 відкрита поруватість одного порядку, але їх розмірний рівень пор та рівномірність розподілу різна, що корелюється з їх межами міцності на стиск. У структурі зразка № 3 крупні відкриті пори зустрічаються рідко, а дрібні (~ 1 мкм та менше) зосереджені навколо крупних зерен периклазового наповнювача на контакт з матричною фазою. Часто зустрічаються мікротріщини у формі напівмісяця, які не перешкоджають прямим контактам зерен переклазу та складаються найменшими мікропорами у вигляді пінних плівок і рідше – контактуючими порожнистими мікросферами різного розміру, які подібні намисту або чоткам. Такий характер поруватості сприятливий для збереження матеріалом міцностних характеристик та ефективно демпфує механічні навантаження від різної величини зміни об'єму зернистого наповнювача й матричної фази під час термоцикловання.

За основу виробництва периклазошпінельних вогнетривів модифікованих TiO_2 в даному випадку можна розглянути чотирикомпонентну систему $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$. Авторами проведено термодинамічні розрахунки системи [17-20], відповідно до яких будова системи має складний характер. Тому вміст відповідних оксидів потрібно ретельно регламентувати для отримання матеріалу певного складу.

В наведених дослідженнях вибір такого складу компонентів обумовлено:

1. Під час випалу оксид алюмінію та заліза (які входять до складу брикету) вступають у реакцію з основним компонентом шихти утворюючи:

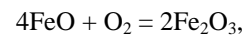


Також можливе утворення інших обернених шпінелей Mg_2TiO_4 (кванділіт) й Fe_2TiO_4 (ульвошпінель). Завдяки різним коефіцієнтам теплового розширення периклазу та шпінелей утворюється рівномірна павутинна структура вогнетриву під час випалу.

2. Додаток TiO_2 сприяє ущільненню утворених шпінелей та захищає їх від інтенсивного окиснення. Високоглиноземистий компонент у складі шихти діє як домішка активуюча спікання, яка сприяє ущільненню матеріалу та утворенню структури з ізольованими мікропорами.

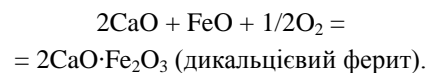
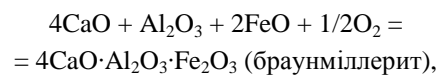
3. Під час експлуатації також утворюються шпінелі з непрореагованих оксидів та компонентів це-

ментного клінкеру, які супроводжуються збільшенням об'єму та заповненням дефектів вогнетриву, що утворюються у процесі служби. Однак збільшення кількості FeO у складі шихти може сприяти його окисненню:



що супроводжується значним збільшення об'єму та руйнуванню матеріалу футерівки, тобто за вмістом FeO у складі зразків повинен бути суворий контроль.

4. Тверді розчини на основі шпінелі під час експлуатації периклазошпінельних вогнетривів у цементних печах частково диспропорціанують на вихідні компоненти та вступають у реакцію з компонентами цементного клінкеру з утворенням на поверхні вогнетриву захисного шару (гарнісажу):



Висновки. Апробовано технологічний підхід введення до складу сировинної шихти для периклазошпінельних вогнетривів вібромолотого модифікатора у вигляді заздалегідь синтезованого продукту, що містить кристалічні фази системи $Al_2O_3 - TiO_2 - FeO$. Результати досліджень фізико-механічних властивостей шести зразків матеріалів показали доцільність і можливість застосування в технологічній практиці чотирьох варіантів складів шихт (№ 2, 3, 5, 6). Показано взаємозв'язок фізико-механічних властивостей з вмістом окремих компонентів у вихідних складах шихт і відзначені напрямки протікання твердофазних процесів з їх участю. Вказано технологічні ризики, що впливають на цілісність структури під час спікання матеріалу та в умовах експлуатації футерівки високотемпературних зон обертових печей випалу цементного клінкеру. Відмічено особливості мікроструктури матеріалу зразка у взаємозв'язку з формуванням оптимального комплексу властивостей, що обумовлено ізотропією теплофізичних характеристик матричної фази з кристалічною решіткою шпінельного типу і анізотропією в зміні лінійних розмірів зерен наповнювача різних фракцій. Показано сприятливий для підвищення термостійкості матеріалу характер організації мікропор, що доповнює фазовий механізм адаптації ще і структурним ефектом демпфірування механічних напружень під час термоцикловання.

Список літератури

- Mujumdar K. S., Ganesh K. V., Kulkarni S. B., Ranade V. V. Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*. 2007. Vol. 62 (9). P. 2590–2607. doi:org/10.1016/j.ces.2007.01.063.
- Stadler K. S., Poland J., Gallestey E. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19 (1). P. 1–9. doi:10.1016/j.conengprac.2010.08.
- Щербя Я., Снежжк Э., Антонович В. Эволюция огнеупорных материалов зоны спекания вращающейся цементной печи. *Новые огнеупоры*. 2017. № 8. С. 31–39. doi:10.17073/1683-4518-2017-8-31-39.
- Contreras J. E., Castillo G. A., Rodríguez E. A., Das T. K., Guzmán A. M. Microstructure and properties of hercynite-magnesia-calcium zirconate refractory mixtures. *Materials Characterization*. 2005. Vol. 54 (4–5). P. 354–359. doi:10.1016/j.matchar.2004.12.005.
- Shubin V. I. Mechanical effects on the lining of rotary cement kilns. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2001. Vol. 42, no. 5. P. 245–250.
- Liu G., Li N., Yan W., Gao C., Zhou W., Li Y. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40 (6). P. 8149–8155. doi:10.1016/j.ceramint.2014.01.01.
- Chen J., Yan M., Su J., Li B., Sun J. The kiln coating formation mechanism of MgO-FeAl₂O₄ brick. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42 (1). P. 569–575. doi:10.1016/j.ceramint.2015.08.14.
- Zheng J., Hu X., Ren Z., Xue X., Chou K. Solid-state Reaction Studies in Al₂O₃-TiO₂ System by Diffusion Couple Method. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57 (10). P. 1762–1766. doi:10.2355/isijinternational.isijint-2017-042.
- Panda S. K., Jung I.-H. Coupled Experimental Study and Thermodynamic Modeling of the Al₂O₃-Ti₂O₃-TiO₂ System. *ISIJ International*. 2019. doi:10.2355/isijinternational.isijint-2019-006. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/advpub/0/advpub_b_ISIJINT-2019-006/_pdf (дата звернення 29.08.2021).
- Li M., Chen F., Shen Q., Zhang L. Fabrication and thermal properties of Al₂TiO₅/Al₂O₃ composites. *Materials Science-Poland*. 2010. Vol. 28, no. 3. P. 663–670.
- Kim H. C., Lee K. S., Kweon O. S., Aneziris G. C., Kim I. J. Crack healing, reopening and thermal expansion behavior of Al₂TiO₅ ceramics at high temperature. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27. P. 1431–1434. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.024.
- Dreval L., Zienert T., Fabrichnaya O. Calculated phase diagrams and thermodynamic properties of the Al₂O₃-Fe₂O₃-FeO system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 657. P. 192–214. doi:10.1016/j.jallcom.2015.10.017.
- Samoilova O. V., Makrovets L. A. Thermodynamic Modeling of Phase Equilibria in the FeO-MgO-Al₂O₃ System. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. P. 3–9. doi:10.4028/www.scientific.net/ms.
- Optimisation of optical methods for strain field measurements dedicated to the characterisation of the fracture behaviour of refractories : Application to magnesia based materials. URL: https://www.researchgate.net/publication/342259507_Optimisation_of_optical_methods_for_strain_field_measurements_dedicated_to_the_characterisation_of_the_fracture_behaviour_of_refractories_Application_to_magnesia_based_materials (дата звернення 29.08.2021).
- Fan H., Chen D., Liu P., Duan H., Huang Y., Long M., Liu, T. Structural and transport properties of FeO-TiO₂ system through molecular dynamics simulations. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 493. P. 57–64. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.04.
- Xuan C., Karasev A., Shibata H., Jönsson P. G. (2016). Retraction: Wetting Behavior of Single Crystal TiO₂ by Liquid Iron. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56 (5). P. 765–769. doi:10.2355/isijinternational.isijint-2015-722.
- Borisenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Mirgorod O. Thermodynamics of Solid-Phase Exchange Reactions Limiting the Subsolidus Structure of the System MgO-Al₂O₃-FeO-TiO₂. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 177–184. doi:org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.177.
- Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Ostapenko I. A. Thermodynamics of phase transitions in the subsolidus domain of the FeO – MgO – TiO₂ system. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. No. 1. P. 12–15. doi:10.32434/0321-4095-2021-134-1-12-15.
- Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Остапенко І. А., Шумейко В. М. Геометро-топологічні характеристики субсолідусної будови системи MgO – Al₂O₃ – TiO₂. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2021. № 1 (5). С. 18–23. doi:org/10.20998/2079-0821.2021.01.03.
- Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Івашура М. М., Івашура А. А. Субсолідусна будова системи MgO – FeO – Al₂O₃. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2021. № 2 (4). С. 59–64. doi:org/10.20998/2413-4295.2021.01.09.

References (transliterated)

- Mujumdar K. S., Ganesh K. V., Kulkarni S. B., Ranade V. V. Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62 (9), pp. 2590–2607, doi:org/10.1016/j.ces.2007.01.063.
- Stadler K. S., Poland J., Gallestey E. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice*, 2011, vol. 19 (1), pp. 1–9, doi:10.1016/j.conengprac.2010.08.
- Shcherba Y. A., Snezhik E., Antonovich V. Evolyutsiya ogneupornykh materialov zony spekaniya vrashchayushcheysoy tsementnoy pechi [The development of the refractory materials for the rotary cement kiln's sintering zone]. *Novye ogneupory* [New refractories], 2017, no. 8, pp. 31–39, doi:10.17073/1683-4518-2017-8-31-39.
- Contreras J. E., Castillo G. A., Rodríguez E. A., Das T. K., Guzmán A. M. Microstructure and properties of hercynite-magnesia-calcium zirconate refractory mixtures. *Materials Characterization*, 2005, vol. 54 (4–5), pp. 354–359, doi:10.1016/j.matchar.2004.12.005.
- Shubin V. I. Mechanical effects on the lining of rotary cement kilns. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2001, vol. 42, no. 5, pp. 245–250.
- Liu G., Li N., Yan W., Gao C., Zhou W., Li Y. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln. *Ceramics International*, 2014, vol. 40 (6), pp. 8149–8155, doi:10.1016/j.ceramint.2014.01.01.
- Chen J., Yan M., Su J., Li B., Sun J. The kiln coating formation mechanism of MgO-FeAl₂O₄ brick. *Ceramics International*, 2016, vol. 42 (1), pp. 569–575, doi:10.1016/j.ceramint.2015.08.14.
- Zheng J., Hu X., Ren Z., Xue X., Chou K. Solid-state Reaction Studies in Al₂O₃-TiO₂ System by Diffusion Couple Method. *ISIJ International*, 2017, vol. 57 (10), pp. 1762–1766, doi:10.2355/isijinternational.isijint-2017-042.
- Panda S. K., Jung I.-H. Coupled Experimental Study and

- Thermodynamic Modeling of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ System. ISIJ International, 2019, doi:10.2355/isijinternational.isijint-2019-006. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/advpub/0/advpub_ISIJINT-2019-006/_pdf (accessed 29.08.202).
10. Li M., Chen F., Shen Q., Zhang L. Fabrication and thermal properties of $\text{Al}_2\text{TiO}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ composites. Materials Science-Poland, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 663–670.
 11. 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. Journal of the European Ceramic Society, 2007, vol. 27, pp. 1431–1434, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.024.
 12. Dreval L., Zienert T., Fabrichnaya O. Calculated phase diagrams and thermodynamic properties of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ system. Journal of Alloys and Compounds, 2016, vol. 657, pp. 192–214, doi:10.1016/j.jallcom.2015.10.017.
 13. Samoilova O. V., Makrovets L. A. Thermodynamic Modeling of Phase Equilibria in the $\text{FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ System. Materials Science Forum, 2020, vol. 989, pp. 3–9, doi:10.4028/www.scientific.net/ms.
 14. Optimisation of optical methods for strain field measurements dedicated to the characterisation of the fracture behaviour of refractories : Application to magnesia based materials. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342259507_Optimisation_of_optical_methods_for_strain_field_measurements_dedicated_to_the_characterisation_of_the_fracture_behaviour_of_refractories_Application_to_magnesia_based_materials (accessed 29.08.2021).
 15. Fan H., Chen D., Liu P., Duan H., Huang Y., Long M., Liu, T. Structural and transport properties of FeO-TiO_2 system through molecular dynamics simulations. Journal of Non-Crystalline Solids, 2018, vol. 493, pp. 57–64, doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.04.
 16. Xuan C., Karasev A., Shibata H., Jönsson P. G. Retraction: Wetting Behavior of Single Crystal TiO_2 by Liquid Iron. ISIJ International, 2016, vol. 56 (5), pp. 765–769, doi:10.2355/isijinternational.isijint-2015-722.
 17. Borisenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Mirgorod O. Thermodynamics of Solid-Phase Exchange Reactions Limiting the Subsolidus Structure of the System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$. Materials Science Forum, 2021, vol. 1038, pp. 177–184, doi:org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.177.
 18. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Ostapenko I. A. Thermodynamics of phase transitions in the subsolidus domain of the FeO - MgO - TiO_2 system. Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii, 2021, no. 1, pp. 12–15, doi:10.32434/0321-4095-2021-134-1-12-15.
 19. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Ostapenko I., Shumejko V. Geometrical-topological characteristics of the subsolidus structure in the $\text{MgO - Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ system. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology, 2021, no 1 (5), pp. 18–23, doi:org/10.20998/2079-0821.2021.01.03.
 20. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Korohodska A., Ivashura M., Ivashura A. Subsolidus structure of the $\text{MgO - FeO - Al}_2\text{O}_3$ system. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technology, 2021, no. 1 (7), pp. 59–64, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

Надійшла (received) 09.10.2021

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.

Гапонова Олена Олександрівна (Гапонова Елена Александровна, Gaponova Olena) – кандидат технічних наук, доцент. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9959-355X>; e-mail: gaponova.czn@gmail.com.