

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОВЕДІНКИ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АЛЮМОСИЛІКАТІВ БАРИЮ ТА СТРОНЦЮ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Волощук В. В.

ВСТУП

Прогрес авіакосмічної промисловості в першу чергу визначається можливостями матеріалів, які використовуються під час створення авіаційних об'єктів. Експлуатація авіаційної та космічної техніки зумовлює достатньо жорсткі вимоги до матеріалів, від характеристик яких істотно залежать надійність та конкурентоспроможність літальних апаратів. У зв'язку зі збільшенням швидкостей літальних апаратів з'являється необхідність створення нових матеріалів, які на ряду з високими робочими температурами забезпечать стабільність експлуатаційних властивостей.

Ефективність сучасних авіаційних та аерокосмічних об'єктів, їх технічні та експлуатаційні характеристики в основному залежать від радіотехнічних систем, які на них встановлено. Важливим питанням є захист антенних систем наземного, водного та повітряного базування за допомогою радіопрозорих керамічних матеріалів. Тому при виготовленні технічних пристроїв одним з найважливіших питань є вибір необхідного керамічного матеріалу, який забезпечить захист електронних приладів від взаємодії з зовнішнім середовищем.

Серед існуючих керамічних радіопрозорих матеріалів найбільший інтерес виявляють до ситалів та спеціальних видів кераміки, таких як нітридна, кварцова, корундова та алюмосилікатна, оскільки вони мають комплекс необхідних властивостей (низькі показники ТКЛР та діелектричних характеристик, високу термостійкість та механічну міцність) з точки зору їх використання для виготовлення деталей аерокосмічної промисловості.

З точки зору експлуатаційних характеристик універсальним матеріалом для промисловості є технічна кераміка, яка є найбільш різноманітною за своїм складом, властивостями та напрямками використання. В залежності від галузі використання розрізняють електротехнічну, радіотехнічну та конструкційну кераміки, а також деякі види спеціального призначення (п'єзо– та феромагнітна, оптично прозора, біокераміка тощо).

Радіопрозорі властивості керамічних матеріалів визначаються їх фазовим складом та структурою. Проведений порівняльний аналіз властивостей алюмосилікатних сполук показав доцільність та

перспективність використання для синтезу радіопрозорих керамічних матеріалів таких кристалічних фаз, як цельзіан та славсоніт. Це можливо за рахунок низьких показників діелектричних властивостей, а також досить високих показників термічної стійкості та температури плавлення. Втім існують невирішені питання щодо умов експлуатації виробів на основі зазначених матеріалів з урахуванням хімічних, газодинамічних та механічних впливів навколишнього середовища.

Вдосконалення методів отримання радіопрозорих матеріалів та методів їх обробки сприятиме таким змінам, як збільшення часу експлуатації виробів, підвищення робочих характеристик та здешевлення витрат на розробку спеціальної техніки, а також на її обслуговування та ремонтні потреби.

1. Огляд хімічно стійких керамічних матеріалів

Високотемпературні керамічні матеріали в процесі експлуатації зазнають теплових, механічних та хімічних навантажень. В свою чергу хімічна стійкість кераміки визначається як здатність витримувати руйнівну дію агресивного середовища. Цей опір залежить від властивостей реагента, хімічного складу та структури кераміки, умов корозійного процесу, особливо на межі кераміки з агресивним середовищем¹. Строк експлуатації таких матеріалів зазвичай визначається ступенем корозії, який він може витримати².

Матеріали на основі глинозему успішно застосовуються в хімічній промисловості в якості підшипників, кульових кранів та інших захисних елементів завдяки своїм досить хорошим механічним властивостям і відносно низькій вартості виробництва³. Ще одним з напрямків використання корунду є нанесення керамічних покриттів на поршні двигунів внутрішнього згорання задля підвищення потужності двигунів, зниження питомої витрати палива та зниженням втрат теплової енергії⁴.

З розширенням діапазону застосування матеріали на основі Al_2O_3 також використовувалися в суворих середовищах, таких як висока температура, розплавлені солі або кислотні чи основні розчини при різних температурах. Хоча корозійна поведінка матеріалів на основі

¹ Valenzuela-Gutiérrez A., López-Cuevas J., González-Ángeles A., Pilalua-Díaz N. Addition of ceramics materials to improve the corrosion resistance of alumina refractories. *SN Applied Sciences*. 2019. № 1. P. 784.

² Başpınar MS, Kara F. Optimization of the corrosion behavior of mullite refractories against alkali vapor via $ZrSiO_4$ addition to the binder phase. *Journal Ceramics-Silikáty*. 2009. Vol. 53, № 4. P. 242–249.

³ Long Huang, ShanShan Luo, Wenkui Li. Corrosion behavior of Al_2O_3 ceramics in the acid and alkaline solutions. *Key Engineering Materials*. 2012. Vols 512–515. P. 509–512.

⁴ Marchenko A., Shpakovskyy V., Volikov V. Corundum pistons increase diesel engine economy and reliability. *Acta Innovations*. 2019. № 33. P. 28–37.

глинозему у водних середовищах була широко вивчена^{5,6,7}, все ще є недостатнім розуміння механізмів корозії у різних середовищах, тому вони потребують подальшого дослідження.

За корозійну стійкість матеріалу приймають його здатність чинити опір корозії в конкретному середовищі чи групі середовищ⁸. Корозійностійкі матеріали бувають: металеві, неметалеві (органічні або неорганічні) та композити на їх основі. При цьому матеріал, що стійкий до одного середовища, може інтенсивно реагувати з іншим. Одним з провідних напрямків серед неметалевих корозійностійких матеріалів є хімічностійка кераміка. Характерними властивостями для неї є щільноспечена структура з високими показниками межі міцності на стиск та при згині, хімічна стійкість по відношенню до дії кислот, лугів та водних розчинів, а також низька газопроникність.

Основна перевага хімічно стійкої кераміки у тривалому терміні служби в умовах одночасної дії кількох факторів: впливу хімічних реагентів, механічні навантаження на вироби та широкий діапазон робочих температур, завдяки чому її використовують для лабораторного приладдя, деталей обладнання та техніки, що працює в умовах агресивного середовища тощо^{9,10}. Тому пріоритетним напрямом розвитку технічної кераміки є розробка енерго- та ресурсозберігаючих технологій отримання хімічно стійкої кераміки, підвищення терміну експлуатації виробів та розширення області їх використання^{11,12,13}.

Кислото- та лугостійкість кераміки визначаються стабільністю їх складових в концентрованих розчинах кислот та лугів. Можливість

⁵ Hirata T., Morimoto T., Ohta S., Uchida N. Improvement of the corrosion resistance of alumina chromia ceramic materials in molten slag. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. № 23. P. 2089–2096.

⁶ Gunnarsson G., Johannesson B. Corrosion of Sodium beta – Alumina Membranes in Molten Sodium Hydroxide. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. № 94. P. 988–990.

⁷ Ćurković L., Jelača M.F., Kurajica S. Corrosion behavior of alumina ceramics in aqueous HCl and H₂SO₄ solutions. *Corrosion Science*. 2008. № 50. P. 872–878.

⁸ Солнцев Ю. П., Беліков С.Б., Волчок І.П., Шейко С.П. Спеціальні конструкційні матеріали: підручник для вищих навч. закладів. Запоріжжя: «ВАЛПС-ПОЛІГРАФ», 2010. 536 с.

⁹ Федоренко О.Ю., Рищенко М.І., Коц Л.С., Бурик О.А., Щукіна Л.П., Вернигора К.П. Розширення сировинної бази виробництва кислотостійкої кераміки. *Зб. наук пр. ПАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного*. Харків : ПАТ «УкрНДІВ», 2013. № 113. С. 171–178.

¹⁰ Черняк Л.П. Розвиток виробництва хімічно стійкої кераміки. *Будівельні матеріали та вироби*. 2004. № 4. С.13–16.

¹¹ Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Лісюткіна М.Ю., Шевцов О.В., Білогубкіна К.В., Регада Н.М. Закономірності фазоутворення, структура та властивості хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2018. № 118. С. 119-131.

¹² Ємченко І.В. Особливості покращення властивостей керамічних виробів шляхом інтенсифікації їх спікання: монографія. Львів: Львівська комерційна академія, 2006. 244 с.

¹³ Agrafiotis C., Tsoutsos T. D. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering*. 2001. № 21 (12). P. 1231-1249.

прогнозування поведінки матеріалів у різному середовищі, вірогідність перебігу реакції, зазвичай визначається знаком показника енергії Гіббса. В результаті термодинамічних розрахунків авторами робіт^{14,15} здійснено порівняльний аналіз хімічної стійкості ряду сполук, таких як муліт, корунд, циркон, а також усі модифікації кварцу, по відношенню до кислих (HCl, HF, H₂SO₄, HNO₃) та лужних розчинів (KOH, NaOH).

Результати досліджень авторів¹⁶ свідчать про те, що за нормальних умов до дії кислот H₂SO₄, HCl, HNO₃ та HF тіаліт є інертним, але з підвищенням температури понад 100°C починає взаємодіяти з фтороводновою кислотою. Муліт демонструє інертність по відношенню до кислих (HCl, H₂SO₄), лужних розчинів (NaOH, KOH) та їх парів до 300°C. Кордієрит та корунд є стійкими до HCl, NaOH та KOH, а целзійан – лише до лугів. Натомість сподумен вступає у взаємодію зі всіма розглянутими хімічними реагентами і, відповідно, не може використовуватися як хімічностійкий матеріал у відношенні до жодного з розглянутих реагентів.

Наприклад, якщо розглянути керамічні матеріали на основі муліту (3Al₂O₃·2SiO₂), їх кислотостійкість складає 99,4-99,8 %, а лугостійкість – 99,6 %. Однак, найбільш вразливою складовою мулітової кераміки є склофаза, тому важливим є збагачення розплаву, що утворюється під час випалу матеріалу, оксидами польовошпатової групи, які здатні підвищити хімічну стійкість склофази до дії агресивних середовищ. В свою чергу кварцова кераміка, що володіє високим рівнем кислотостійкості (99,6 – 99,8 %), має досить незначні показники лугостійкості (51,0 %)¹⁷.

¹⁴ Рищенко М.І., Пітак Я.М., Федоренко Є.Ю., Лісюткіна М.Ю., Бурик О.А. Будова системи MgO–Al₂O₃–TiO₂–SiO₂ та її значення для виробництва термічно і хімічно стійкої кераміки. *Питання хімії та хімічної технології*. 2015. № 3 (101). С. 73–79.

¹⁵ Ryschenko M.I., Pitak Ya.N., Fedorenko E.Yu., Lisyutkina M.Yu., Shevtsov A.V. Subsolidus conceptual design of CaO – Al₂O₃–TiO₂–SiO₂ system and its significance for manufacturing advanced ceramics. *China's refractories*. Henan, Jan. Mar., 2016. Vol. 25, № 1. P. 44–52.

¹⁶ Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Лісюткіна М.Ю., Шевцов О.В., Білогубкіна К.В., Регеда Н.М. Закономірності фазоутворення, структура та властивості хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2018. № 118. С. 119-131.

¹⁷ Федоренко О.Ю., Рищенко М.І., Коц Л.С., Бурик О.А., Щукіна Л.П., Вернигора К.П. Розширення сировинної бази виробництва кислотостійкої кераміки. *Зб. наук. пр. ПАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного*. Харків : ПАТ «УкрНДІВ», 2013. № 113. С. 171–178.

У роботах^{18,19,20} досліджували синтез хімічно стійкої кераміки на основі системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$. Розроблені склади муліт-тіалітової та тіалітвмісної кераміки характеризувалися високими показниками хімічної стійкості по відношенню до 20 % розчину HCl та 35 % розчину NaOH (кислотостійкість – 99,4 %, лугостійкість – 99,9 %), що обумовлено присутністю в матеріалі не тільки тіаліту, а й склофазы яка збагачена SiO_2 , що підтверджують результати рентгенофазового аналізу та петрографічних досліджень.

Згідно проведеного літературного огляду науково-технічної інформації зарубіжних та вітчизняних джерел виявлено, що наразі провідними країнами світу переважно досліджується хімічна стійкість лише склокерамічних матеріалів та покриттів на їх основі^{21,22,23,24}. В свою чергу, інформації щодо проведення ні теоретичних, ні експериментальних досліджень по визначенню показників хімічної стійкості для цельзіанової та славсонітової кераміки виявлено не було. Тому вивчення хімічної стійкості керамічних матеріалів на основі систем $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ та $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ є актуальною задачею сучасного матеріалознавства та пріоритетним напрямком подальших досліджень.

2. Термодинамічний аналіз взаємодії цельзіану та славсоніту по відношенню до лужних та кислотних реагентів

Хімічна стійкість керамічних матеріалів розглядається як здатність протистояння впливу реагентів, середовища або матеріалів, які

¹⁸ Рищенко М.І., Пітак Я.М., Федоренко Є.Ю., Лісюткіна М.Ю., Бурик О.А. Будова системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ та її значення для виробництва термічно і хімічно стійкої кераміки. *Питання хімії та хімічної технології*. 2015. № 3 (101). С. 73–79.

¹⁹ Лісюткіна М.Ю., Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Дайнеко К.Б., Шевцов О.В. Тіаліто- та муліто-тіалітовмісна кераміка в системі $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ на основі вітчизняної сировини. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2017. № 117. С. 185–195.

²⁰ Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Лісюткіна М.Ю., Дайнеко К.Б. Методологічні і технологічні аспекти розробки хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів. *Будівельні матеріали та виробн.* 2017. № 5-6. С. 10–14.

²¹ Bolelli G., Cannillo V., Lusvardi L., Manfredini T., Siligardi C., Bartuli C., Loreto A., Valente T. Plasma-sprayed glass-ceramic coatings on ceramic tiles: microstructure, chemical resistance and mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. № 25. P. 1835–1853.

²² Abdel-Hameed S.A.M., El-kheshen A.A. Thermal and chemical properties of diopside-wollastonite glass-ceramics in the $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ system from raw materials. *Ceramics International*. 2003. № 29. P. 265–269.

²³ Guo X., Cai X., Song J., Yang G., Yang H. Crystallization and microstructure of $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics containing complex nucleation agents. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2014. № 405. P. 63–67.

²⁴ Kang J., Wang J., Zhou X., Yuan J., Hou Y., Qian S., Li S., Yue Y. Effects of alkali metal oxides on crystallization behavior and acid corrosion resistance of cordierite-based glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. № 481. P. 184–190.

знаходиться у взаємодії з керамічним матеріалом та визначається природою фаз, що вступають у взаємодію, їх хімічним складом, а також є однією з головних властивостей керамічних конструкційних матеріалів, призначених для експлуатації в агресивних середовищах.

Враховуючи проведений аналіз наукової та патентної літератури в напрямку розробки радіопрозорих керамічних матеріалів для дослідження було обрано трикомпонентну систему RO– Al₂O₃-SiO₂ (RO – SrO, BaO) та визначено кристалічні фази, які можуть існувати в їх межах^{25,26,27} (табл. 1).

Таблиця 1

**Бінарні та потрійні кристалічні фази
в дослідних потрійних системах**

Системи	Кристалічні фази	
	Потрійні	Бінарні
SrO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	SrO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	SrO·SiO ₂
		2SrO·SiO ₂
	2SrO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	3SrO·SiO ₂
		SrO·Al ₂ O ₃
	2SrO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	SrO·2Al ₂ O ₃
		SrO·6Al ₂ O ₃
	6SrO·9Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	3SrO·Al ₂ O ₃
		4SrO·Al ₂ O ₃
		5SrO·Al ₂ O ₃
		Al ₂ O ₃ ·SiO ₂
Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂		
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂		
BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	BaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	α-модифікація
		β-модифікація
		γ-модифікація
	BaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	BaO·SiO ₂
		BaO·2SiO ₂
		2BaO·SiO ₂
		2BaO·3SiO ₂
BaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	BaO·Al ₂ O ₃	
	BaO·6Al ₂ O ₃	
	3BaO·Al ₂ O ₃	
		3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂

²⁵ Podbolotov K.B., Volochko A.T., Lisachuk G.V., Krivobok R.V., Voloshchuk V.V. Exothermic synthesis of ceramic materials based on barium and strontium aluminosilicates. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. №. 6. P. 57–64.

²⁶ Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov E.V., Lapuzina O.M., Voloshchuk V.V., Samoilenko N.N.: Technological parameters of ceramics creation on the basis of slavonsite. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2019. Vol. 71, No. 2. P. 46–51.

²⁷ Lisachuk G., Kryvobok R., Voloshchuk V., Lapuzina O., Zakharov A. Study of Technological Features of Celsian Ceramics Creation. *IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties* (м. Одеса, 05-11 вересня 2021 р.). Одеса, 2021. P. 1–4.

Слід зауважити, що окрім наведених в табл. 1 кристалічних фаз в системі існує значна кількість твердих розчинів на їх основі. Можливо зробити припущення, що хімічна стійкість твердих розчинів буде визначатися відповідним показником найменш стійкої фази, яка входить до їх складу. Тому при оцінці хімічної стійкості кристалічних фаз у вищенаведеній системі доцільним буде проводити дослідження лише для наведених кристалічних фаз, а оцінюючи хімічну стійкість твердих розчинів спиратися на їх фазовий склад та співвідношення фаз між собою.

Для обґрунтування вибору кристалічної фази, як основи радіопрозорого керамічного матеріалу який буде експлуатуватися в агресивних середовищах доцільним є проведення термодинамічних розрахунків, а саме змін вільної енергії Гіббса хімічних реакцій взаємодії кристалічної фази з агресивним середовищем. Порівнюючи між собою результати розрахунків можливо обрати саме ті кристалічні фази, які дозволять одержати керамічний матеріал з необхідним рівнем хімічної стійкості. Термодинамічні константи та константи теплоємності сполук для розрахунків реакцій в обраних системах були взяті з наступних літературних даних^{28,29}.

Однак, слід зауважити, що при виборі кристалічних фаз слід враховувати комплекс фізико-хімічних та експлуатаційних вимог до радіопрозорих матеріалів. Головними вимогами до керамічних РПМ є низькі значення діелектричних властивостей (значення діелектричної проникності < 10 , тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta \leq 0,01$) та стабільність фізичних та електродинамічних характеристик за високих робочих температур у широкому частотному діапазоні.

Тому, як найбільш оптимальні для проведення розрахунків були обрані наступні кристалічні фази: потрійні – цельзіан $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ та славсоніт $\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ і подвійні – $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$ та $2\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$. В свою чергу для визначення кислотостійкості були обрані нітратна, хлоридна та сірчана кислоти, а для визначення лугостійкості – гідроксид та карбонат натрію. Розрахунки проводили, в умовах наближених до умов експлуатації, а саме за температури 298 К.

Для обраних кристалічних фаз та речовин складено хімічні рівняння, які можуть відбуватися при вказаній температурі. Виходячи з того, що оксид

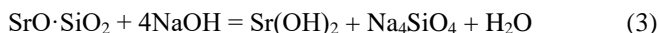
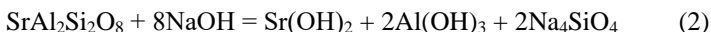
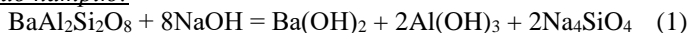
²⁸ Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Fedorenko E.Y., Prytkina M.S. Thermodynamic analysis of solid phase reactions in $\text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ system. *Function Materials*. 2016. № 1 (23). P. 71–74.

²⁹ Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Chefranov E.V., Voloshchuk V.V. Theoretical prerequisites for creation of radio transparent ceramic materials based on the system $\text{BaO} - \text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. *Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences: collective monograph*. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2021. Vol. 2. P. 282–318.

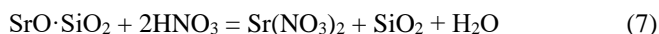
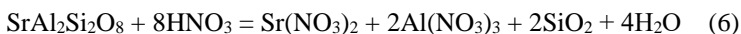
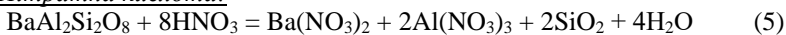
силіціюму відноситься до групи кислотних оксидів, та не вступає в реакції з водою та кислотами, крім плавикової, було зроблено припущення, що в продуктах реакції він буде знаходитися у вигляді β-кварц.

Враховуючи розрахунок перебігу реакцій в стандартних умовах, продуктом реакції визначених кристалічних фаз з гідрооксидом натрію буде саме Na_4SiO_4 , а не Na_2SiO_3 , який утворюється лише при температурах вище 1173 К:

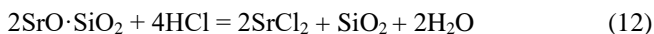
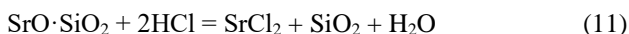
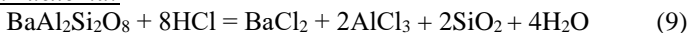
Гідрооксид натрію:



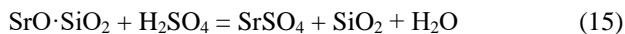
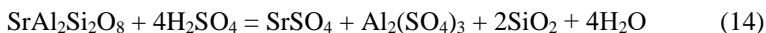
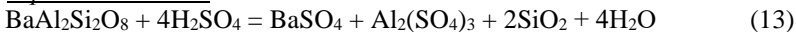
Нітратна кислота:



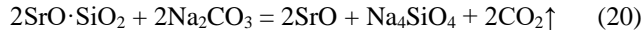
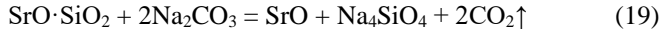
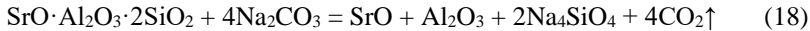
Хлоридна кислота:



Сірчана кислота:



Карбонат натрію:



Для проведення розрахунків змін вільної енергії Гіббса наведених реакцій на основі відомих літературних даних були визначені відповідні термодинамічні дані вихідних речовин і продуктів реакції (табл. 2).

Таблиця 2

Вихідні термодинамічні дані для розрахунків

Роль компонента	Сполука	$-\Delta H^0_{298}$, кДж/моль	S^0_{298} , Дж/(моль·К)	$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2$, Дж/(моль·К)		
				a	$b \cdot 10^3$	$-c \cdot 10^5$
Вихідні компоненти	BaAl ₂ Si ₂ O ₈	4273,58	200,73	260,75	61,40	-
	SrAl ₂ Si ₂ O ₈	4235,79	199,12	266,60	77,32	-
	SrO · SiO ₂	1632,92	94,19	112,02	19,21	30,31
	2SrO · SiO ₂	2303,26	150,50	154,04	28,05	31,49
	NaOH	495,93	64,43	-	-	-
	HNO ₃	174,10	155,60	26,53	4,6	1,09
	HCl (р)	163,70	56,50	-	-	-
	H ₂ SO ₄	907,50	17,20	-	-	-
	Na ₂ CO ₃	1129,40	134,90	-	-	-
Продукти реакції	Ba(OH) ₂	947,05	100,83	70,71	91,63	-
	Al(OH) ₃	1276,97	82,90	8,65	45,60	-
	Na ₄ SiO ₄	2106,64	195,81	-	-	-
	Sr(OH) ₂	965,0	94,00	-	-	-
	H ₂ O (р)	285,83	69,95	39,02	76,64	11,96
	Ba(NO ₃) ₂	991,60	213,70	125,70	149,40	16,78
	Al(NO ₃) ₃	2850,10	468,00	149,93	27,38	35,67
	SiO ₂ , β-кварц	911,07	42,09	46,94	34,31	11,3
	Sr(NO ₃) ₂	984,10	194,60	-	-	-
	BaCl ₂	844,00	123,70	-	-	-
	AlCl ₃	704,20	109,30	-	-	-
	SrCl ₂	878,64	112,97	-	-	-
	BaSO ₄	1465,20	132,20	125,10	5,70	-
	Al ₂ (SO ₄) ₃	3431,70	239,30	368,60	61,90	113,50
	SrSO ₄	1444,74	121,75	26,25	11,30	2,53
	BaO	558,15	70,29	53,30	4,35	8,30
	Al ₂ O ₃	1675,61	50,92	114,77	12,08	35,44
	SrO	590,36	54,39	51,63	4,69	7,56
CO ₂	393,51	213,94	44,14	9,04	8,54	

Результати термодинамічних розрахунків змін ентальпії, ентропії та вільної енергії Гіббса реакцій наведені у табл. 3. Окремо слід зауважити, що можливе протікання гідратації продуктів вищенаведених реакцій, наприклад $\text{Sr}(\text{OH})_2$ у його гексагідрат, але враховуючи те, що ні в вихідних речовинах, ні в продуктах реакцій гідратації дослідних кристалічних фаз немає, то ними можна знехтувати.

Таблиця 3

Результати термодинамічних розрахунків для реакцій (1 – 20)

Номер реакції	ΔH_{298} , кДж/моль	ΔS_{298} , Дж/(моль·К)	ΔG_{298} , кДж/моль
<i>Гідрооксид натрію</i>			
1	526,75	-57,92	544,02
2	471,01	-63,14	489,84
3	259,17	7,85	256,83
4	250,34	-24,41	32,31
<i>Нітратна кислота</i>			
5	-3990,88	68,19	-4011,21
6	-4021,17	50,06	-4036,10
7	-199,88	-98,75	-170,44
8	-451,27	-201,71	-391,13
<i>Хлоридна кислота</i>			
9	365,32	53,55	349,35
10	292,89	44,43	279,64
11	-115,22	17,82	-120,53
12	-281,95	31,43	-291,32
<i>Сірчана кислота</i>			
13	41,22	465,95	-97,70
14	23,89	457,11	-112,40
15	-101,22	122,40	-137,71
16	-253,95	296,90	-342,47
<i>Карбонат натрію</i>			
17	707,10	628,26	582,78
18	700,10	613,97	517,05
19	407,70	314,09	314,05
20	487,68	312,17	394,61

Одержані результати свідчать про можливість протікання реакцій (р. 5 – 8, 11 – 16), тобто хімічна стійкість матеріалів до агресивних середовищ буде проявлятися в реакціях (р. 1 – 4, 9, 10, 17 – 20). Візуально розраховані дані представлені на діаграмі рис. 1.

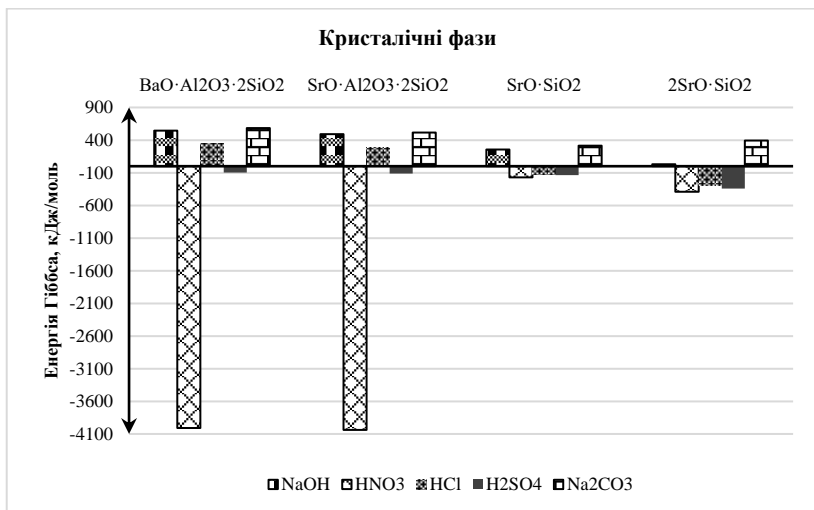


Рис. 1. Енергія Гіббса для модельних кристалічних фаз в різних агресивних середовищах

Порівнюючи між собою одержані дані можна відзначити, що найбільшу реактивну здібність з досліджених реагентів на обрані фази має нітратна кислота, але фаза SrO·SiO₂ буде найбільш стійкою до її дії (р. 7).

Сірчана кислота H₂SO₄ також взаємодіє з усіма обраними сполуками, однак з достатньо низькою вірогідністю протікання реакцій. Найбільш термодинамічно вигідною реакцією (р. 16) є взаємодія кислоти з фазою 2SrO·SiO₂, а целз'ян та славсоніт можна вважати найбільш корозійностійкими сполуками по відношенню до розглянутого реагента (р. 13, 14), тому їх гетерофазна композиція буде також визначатися високою хімічною стійкістю.

По відношенню до реагента HCl згідно термодинамічних розрахунків реакцій (р. 9, 10) з фазами целз'яну та славсоніту є термодинамічно не вигідними, що дозволяє зробити припущення про прояв кислотостійкості сполук. Щодо фаз SrO·SiO₂ та 2SrO·SiO₂ існує невисока вірогідність протікання реакцій взаємодії з хлоридною кислотою.

Щодо взаємодії дослідних фаз із лужними реагентами (NaOH, Na₂CO₃) згідно термодинамічних розрахунків змін ентальпії, ентропії та вільної енергії Гіббса реакції (р. 1 – 4, 17 – 20) є термодинамічно не вигідними, тому усі сполуки можна вважати корозійностійкими по відношенню до лужного середовища.

3. Дослідження хімічної стійкості керамічних матеріалів на основі цельзіану та славсоніту

Поверхня виробів з керамічних матеріалів в процесі експлуатації, як правило, піддається корозійному впливу зовнішнього середовища. Це може бути як хімічна взаємодія компонентів керамічного матеріалу з елементами зовнішнього середовища, так і їх розчинення в об'ємі зовнішнього середовища. Під час корозії зазвичай відбувається взаємна дифузія йонів (атомів) кераміки та агресивного середовища. Під час процесу дифузії руйнування керамічного виробу може не відбуватися, однак його властивості змінюватимуться настільки, що його подальше використання за призначенням ставатиме неможливим.

Хімічна стійкість технічної кераміки розглядається як здатність протистояти впливу будь якого реагента, що знаходиться у взаємодії з керамікою та визначається в першу чергу природою фаз, що взаємодіють, та їх хімічним складом.

Для проведення досліджень хімічної стійкості були обрані зразки цельзіанової (RTC-C) та славсонітової (RTC-S) керамік отримані за двостадійною керамічною технологією. Синтез кристалічних фаз здійснювали в муфельній печі за температури 1250 °C для славсоніту та 1200 °C для цельзіану, з витримкою за максимальної температури 2 години. Для отримання дослідних зразків синтезований матеріал подрібнювали до 3 мм та проводили помел у планетарному млині Retsch PM 100 з додаванням дистильованої води та добавки Dolapix PC 67 (Zchimmer & Schwarz, Німеччина) для отримання шлікера вологістю 30 %. Після висушування заготовок до остаточної вологості менше 1 % здійснювали випал дослідних зразків у силітвовій печі: температура випалу – 1350 °C, витримка за максимальної температури – 4 години.

Хімічна стійкість досліджуваних складів кераміки^{30,31} визначалася за допомогою зернового методу згідно ДСТУ Б В.2.7-256:2011, по відношенню до: H₂O (морська), 5 %-го розчину HCl, 20 %-них розчинів H₂SO₄, NaOH та Na₂CO₃.

Маса дослідної проби складала 5,000 г, розмір часток подрібненого матеріалу складав від 2,0 до 3,0 мм. Зважування здійснюють на аналітичних вагах Radwag TBE-0,21-0,001 з точністю до 0,001 г. Для

³⁰ Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Масаликін Р.А., Кривобок Н.А. Хімічна стійкість цельзіанової кераміки у кислотному та лужному реагентах. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки* : зб. наук. пр. Харків, 2021. № 121. С. 129–139.

³¹ Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Рябініна А.С., Масаликін Р.А., Тимченко О.Р. Дослідження хімічної стійкості цельзіанової кераміки. *Технологія та застосування вогнетривів і технічної кераміки у промисловості*: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2021. С. 28–29.

прикладу на рис. 2 представлено підготовлену до експерименту пробу цельзіанової кераміки.



Рис. 2. Проба цельзіану для визначення хімічної стійкості

Для визначення кислотостійкості кераміки підготовлену пробу розміщували в плоскодонній колбі з хімічно-стійкого скла. В колбу для випробувань заливали 50 мл або 5 %-го розчину HCl, або 20 %-го розчину H₂SO₄ кімнатної температури, та настоювали протягом 3 діб у захищеному від сонця місці (рис. 3).



Рис. 3. Визначення кислотостійкості керамічних проб

Після цього, для нейтралізації розчину кислоти в колбу доливали 50 мл дистильованої води невеликими порціями, обережно перемішуючи склянню паличкою та проціджували вміст колби через без зольний фільтр (рис. 4). Осад висушували до моменту, коли його вага переставала змінюватись.



Рис. 4. Проба матеріалу після проціджування на без зольному фільтрі

Після зважування кислотостійкість визначають за загальною формулою :

$$K = (G_1 / G_0) \cdot 100\%$$

де G_0 – початкова вага проби порошка, г

G_1 – вага осаду, висушеного до постійної ваги після обробки реагентом, г

Для визначення лугостійкості цельзіанової та славсонітової керамік в якості реагентів використовували 50 мл 20 %-го розчину NaOH та 20 %-го розчину Na_2CO_3 (рис. 5). Визначення здійснювали аналогічно визначенню кислотостійкості. Для визначення водостійкості в якості реагента використовували 50 мл морської H_2O . Визначення здійснювали аналогічно визначенню кислотостійкості.

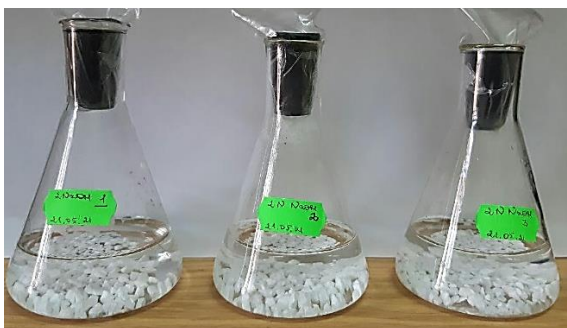


Рис. 5. Визначення лугостійкості керамічних проб

За результат досліджень приймали вибіркове середнє значення трьох паралельних випробувань з округленням до 0,01 %. Після зважування отриманих проб результати випробувань заносили в табл. 4.

**Хімічна стійкість кераміки по відношенню
до агресивних середовищ**

Зразок	Хімічна стійкість (%) по відношенню до:				
	5 % розчин HCl	20 % розчин H ₂ SO ₄	20 % розчин NaOH	20 % розчин Na ₂ CO ₃	H ₂ O (морська)
RTC-C	99,58	98,72	99,94	99,96	100,00
RTC-S	99,43	98,56	99,92	99,94	100,00

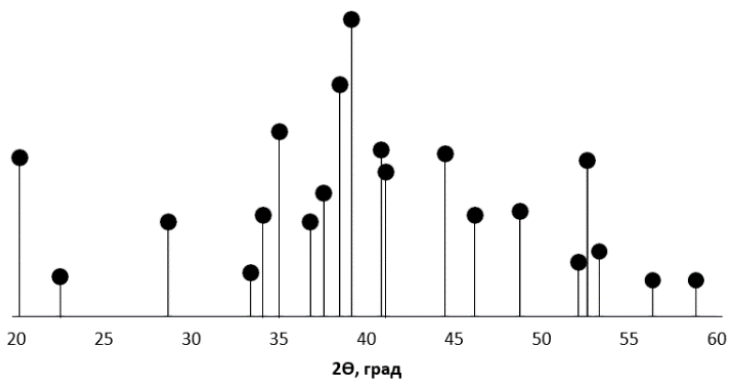
Аналізуючи результати вивчення хімічної стійкості обраних серій цельзіанової та славсонітової керамік (табл. 4) бачимо, що досліджені зразки згідно ДСТУ Б В.2.7-256:2011 відносяться до класу кислотостійких матеріалів по відношенню до обраних реагентів.

По відношенню до розчинів кислот стійкість керамічних проб змінюється в інтервалі 98,56 – 99,58 %, по відношенню до лугів показники коливаються в інтервалі 99,92 – 99,96 %. Також досліджені керамічні серії продемонстрували відсутність взаємодії з морською H₂O, тобто вони мають високі показники водостійкості.

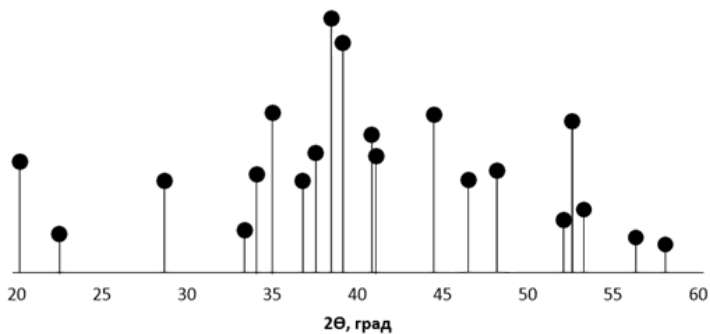
Структурно-фазові особливості цельзіанової (RTC-C) та славсонітової (RTC-S) керамік вивчали для зразків як до обробки реагентами, так і після випробувань за допомогою рентгенофазового аналізу. Для прикладу на рис. 6 та рис. 7 наведені штрих-рентгенограми зразків RTC-C та RTC-S до випробувань та після обробки лужним реагентом (20 %-ий розчин NaOH).

Вивчення фазового складу дослідних зразків до обробки вказало на наявність лише чистих фаз цельзіану та славсоніту. Після визначення кислото-, лугостійкості та водостійкості матеріалу рентгенофазовий аналіз також виявив лише чисті фази дослідних керамічних зразків, що підтверджує відсутність взаємодії розроблених керамічних матеріалів з дослідженими реагентами.

Експериментально встановлено, що по відношенню до обраних реагентів досліджені керамічні склади (RTC-C, RTC-S) не розчинні та мають наступні значення: кислотостійкість у межах 98,56 – 99,58 %, лугостійкість у межах 99,92 – 99,96 %, водостійкість – 100,00 %. Вивчення мікроструктури та фазового складу керамічних зразків після обробки реагентами показали, що у всіх досліджених зразках присутні тільки кристалічні фази славсоніту та цельзіану, тобто процесу корозії не відбувається.



а)



б)

● – α-цельзіан ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Рис. 6. Штрих-рентгенограма зразка RTC-C:
а) до обробки реагентом; б) після обробки 20 % розчином NaOH

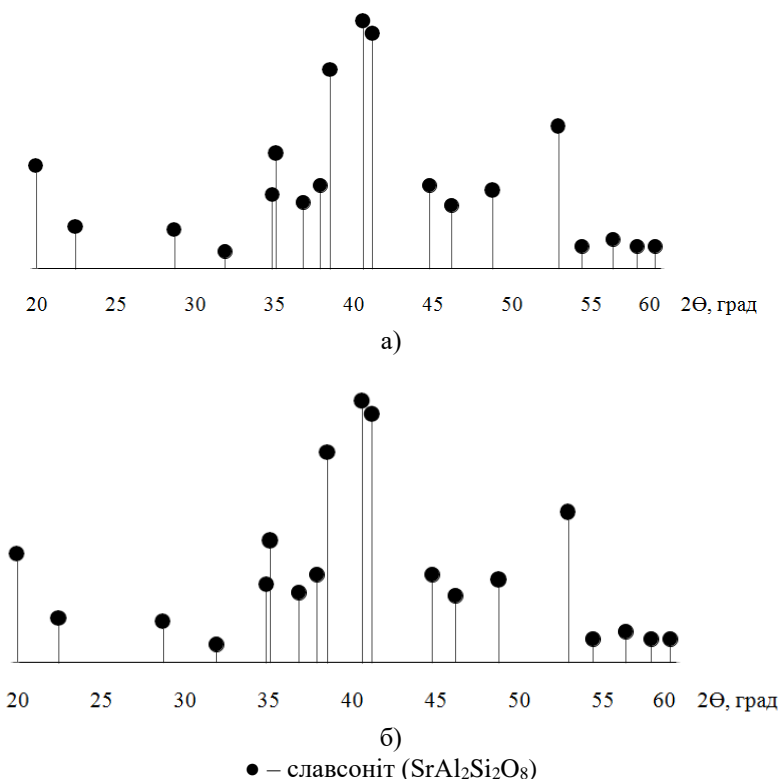


Рис. 7. Штрих-рентгенограма зразка RTC-S:
а) до обробки реагентом; б) після обробки 20 % розчином NaOH

ВИСНОВКИ

Переважно стійкість кераміки залежить не тільки від фазового складу, а й від часу та умов перебування її в агресивному середовищі. Тому для детального вивчення процесів, які відбуваються в керамічних матеріалах при взаємодії з різними агресивними середовищами за умов підвищеної температури або тиску, необхідно залучати експериментальні дослідження. Вони дозволяють спростувати або підтвердити дані, які отримують з розрахунків.

В даному дослідженні проведено прогнозу оцінку хімічної стійкості кераміки цельзіанового та славсонітового складів на основі термодинамічного аналізу реакцій цельзіану та славсоніту з кислотними (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) та лужними (NaOH , Na_2CO_3) реагентами.

Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що сполуки систем $\text{RO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ($\text{RO} = \text{SrO}$, BaO), які приймають участь

в утворенні цільових фаз, виявлятимуть високу хімічну стійкість до дії стандартних розчинів луг NaOH , Na_2CO_3 (99,92 – 99,96 %).

Реакції хлороводневої кислоти HCl з дослідженими фазами цельзіану та славсоніту виявилися термодинамічно невігідними, що експериментально підтверджується показниками кислотостійкості цільових сполук (99,43 – 99,58 %). Сірчана кислота H_2SO_4 взаємодіє з обраними сполуками, однак з низькою вірогідністю протікання реакцій, що обумовлює кислотостійкість кераміки в межах 98,56 – 98,72 %.

Також досліджені керамічні зразки продемонстрували високі показники водостійкості з морською H_2O (100 %), що дозволяє використовувати вироби, виготовлені на їх основі, при базуванні в морських акваторіях.

АНОТАЦІЯ

У роботі теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість використання радіопрозорих керамічних матеріалів на основі цельзіану та славсоніту для виготовлення захисних елементів конструкцій авіаційних об'єктів. Проведено термодинамічний аналіз реакцій взаємодії обраних складів кераміки з лужним та кислотним середовищами. За результатами термодинамічних розрахунків обґрунтовано вірогідність взаємодії цельзіанової та славсонітової кераміки з кислотними (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) та лужними (NaOH , Na_2CO_3) реагентами. Зразки для проведення експериментальних досліджень отримували за двостадійною керамічною технологією. Синтез кристалічних фаз здійснювали в муфельній печі за температури 1250 °C для славсоніту та 1200 °C для цельзіану, з витримкою за максимальної температури 2 години. Випал дослідних зразків здійснювали в силітовій печі за оптимальних технологічних параметрів: температури випалу – 1350 °C та витримці за максимальної температури – 4 години. Експериментально підтверджено, що радіопрозорі керамічні матеріали на основі цельзіану та славсоніту мають підвищену хімічну стійкість до стандартних розчинів луг NaOH , Na_2CO_3 (99,92 – 99,96 %) та хлороводневої кислоти (99,43 – 99,58 %). Враховуючи значення енергії Гіббса, показано, що найбільш негативний вплив на розглянуті керамічні матеріали виявляє нітратна кислота. За результатами проведених досліджень керамічні матеріали цельзіанового та славсонітового складів здатні витримувати хімічний вплив зовнішнього середовища, що дає можливість використовувати їх для ефективного захисту радіолокаційних систем авіаційних та аерокосмічних об'єктів.

Література

1. Valenzuela-Gutiérrez A., López-Cuevas J., González-Ángeles A., Pilalua-Díaz N. Addition of ceramics materials to improve the corrosion resistance of alumina refractories. *SN Applied Sciences*. 2019. № 1. P. 784.

2. Başpınar MS, Kara F. Optimization of the corrosion behavior of mullite refractories against alkali vapor via ZrSiO₄ addition to the binder phase. *Journal Ceramics-Silikáty*. 2009. Vol. 53, № 4. P. 242–249.
3. Long Huang, ShanShan Luo, Wenkui Li. Corrosion behavior of Al₂O₃ ceramics in the acid and alkaline solutions. *Key Engineering Materials*. 2012. Vols 512–515. P. 509–512.
4. Marchenko A., Shpakovsky V., Volikov V. Corundum pistons increase diesel engine economy and reliability. *Acta Innovations*. 2019. № 33. P. 28–37.
5. Hirata T., Morimoto T., Ohta S., Uchida N. Improvement of the corrosion resistance of alumina chromia ceramic materials in molten slag. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. № 23. P. 2089–2096.
6. Gunnarsson G., Johannesson B. Corrosion of Sodium beta – Alumina Membranes in Molten Sodium Hydroxide. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. № 94. P. 988–990.
7. Ćurković L., Jelača M.F., Kurajica S. Corrosion behavior of alumina ceramics in aqueous HCl and H₂SO₄ solutions. *Corrosion Science*. 2008. № 50. P. 872–878.
8. Солнцев Ю. П., Беліков С.Б., Волчок І.П., Шейко С.П. Спеціальні конструкційні матеріали: підручник для вищих навч. закладів. Запоріжжя: «ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ», 2010. 536 с.
9. Федоренко О.Ю., Рищенко М.І., Коц Л.С., Бурик О.А., Щукіна Л.П., Вернигора К.П. Розширення сировинної бази виробництва кислотостійкої кераміки. *Зб. наук. пр. ПАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного*. Харків : ПАТ «УкрНДІВ», 2013. № 113. С. 171–178.
10. Черняк Л.П. Розвиток виробництва хімічно стійкої кераміки. *Будівельні матеріали та вироб.* 2004. № 4. С.13–16.
11. Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Лісюткіна М.Ю., Шевцов О.В., Білогубкіна К.В., Регада Н.М. Закономірності фазоутворення, структура та властивості хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2018. № 118. С. 119-131.
12. Ємченко І.В. Особливості покращення властивостей керамічних виробів шляхом інтенсифікації їх спікання: монографія. Львів: Львівська комерційна академія, 2006. 244 с.
13. Agrafiotis C., Tsoutsos T. D. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering*. 2001. № 21 (12). P. 1231-1249.
14. Рищенко М.І., Пітак Я.М., Федоренко С.Ю., Лісюткіна М.Ю., Бурик О.А. Будова системи MgO–Al₂O₃–TiO₂–SiO₂ та її значення для виробництва термічно і хімічно стійкої кераміки. *Питання хімії та хімічної технології*. 2015. № 3 (101). С. 73–79.
15. Ryschenko M.I., Pitak Ya.N., Fedorenko E.Yu., Lisyutkina M.Yu., Shevtsov A.V. Subsolidus conceptual design of CaO – Al₂O₃–TiO₂–SiO₂

system and its significance for manufacturing advanced ceramics. *China's refractories*. Henan, Jan. Mar., 2016. Vol. 25, № 1. P. 44–52.

16. Лісюткіна М.Ю., Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Дайнеко К.Б., Шевцов О.В. Тіаліто– та муліто–тіалітовмісна кераміка в системі $MgO-SiO_2-Al_2O_3-TiO_2$ на основі вітчизняної сировини. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2017. № 117. С. 185–195.

17. Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Лісюткіна М.Ю., Дайнеко К.Б. Методологічні і технологічні аспекти розробки хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів. *Будівельні матеріали та вироби*. 2017. № 5-6. С. 10–14.

18. Bolelli G., Cannillo V., Lusvarghi L., Manfredini T., Siligardi C., Bartuli C., Loreto A., Valente T. Plasma-sprayed glass-ceramic coatings on ceramic tiles: microstructure, chemical resistance and mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. № 25. P. 1835–1853.

19. Abdel-Hameed S.A.M., El-kheshen A.A. Thermal and chemical properties of diopside-wollastonite glass-ceramics in the $SiO_2-CaO-MgO$ system from raw materials. *Ceramics International*. 2003. № 29. P. 265–269.

20. Guo X., Cai X., Song J., Yang G., Yang H. Crystallization and microstructure of $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ glass-ceramics containing complex nucleation agents. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2014. № 405. P. 63–67.

21. Kang J., Wang J., Zhou X., Yuan J., Hou Y., Qian S., Li S., Yue Y. Effects of alkali metal oxides on crystallization behavior and acid corrosion resistance of cordierite-based glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. № 481. P. 184–190.

22. Podbolotov K.B., Volochko A.T., Lisachuk G.V., Krivobok R.V., Voloshchuk V.V. Exothermic synthesis of ceramic materials based on barium and strontium aluminosilicates. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. №. 6. P. 57–64. URL: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-139-6-57-64>

23. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov E.V., Lapuzina O.M., Voloshchuk V.V., Samoilenko N.N.: Technological parameters of ceramics creation on the basis of slavsonite. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2019. Vol. 71, No. 2. P. 46–51. URL: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.9>

24. Lisachuk G., Kryvobok R., Voloshchuk V., Lapuzina O., Zakharov A. Study of Technological Features of Celsian Ceramics Creation. *IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties* (м. Одеса, 05-11 вересня 2021 р.). Одеса, 2021. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9568546>

25. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Fedorenko E.Y., Prytkina M.S. Thermodynamic analysis of solid phase reactions in $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ system. *Function Materials*. 2016. № 1 (23). P. 71–74.

26. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Chefranov E.V., Voloshchuk V.V. Theoretical prerequisites for creation of radio transparent ceramic materials based on the system BaO – SrO – Al₂O₃ – SiO₂. *Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences: collective monograph*. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2021. Vol. 2. P. 282–318. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-086-5-27>

27. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Масаликін Р.А., Кривобок Н.А. Хімічна стійкість цельзіанової кераміки у кислотному та лужному реагентах. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки* : зб. наук. пр. Харків, 2021. № 121. С.129–139. URL: <https://doi.org/10.35857/2663-3566.121.14>

28. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Рябініна А.С., Масаликін Р.А., Тимченко О.Р. Дослідження хімічної стійкості цельзіанової кераміки. *Технологія та застосування вогнетривів і технічної кераміки у промисловості: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції*. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2021. С. 28–29.

Information about the authors:

Lisachuk Georgiy Viktorovych,

Doctor of Engineering,

Professor at the Department of Technology of Ceramics, Refractories,

Glass and Enamels

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Deputy Head of Scientific and Research Part

2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Kryvobok Ruslan Viktorovych,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Technology of Ceramics,

Refractories, Glass and Enamels

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Head of Scientific and Research Part

2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Voloshchuk Valentyna Vasylivna,

Doctor of Philosophy,

Junior researcher at the Scientific and Research Part

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine