



Рищенко М. І.



Федоренко О. Ю.



Лісюткіна М. Ю.



Дайнеко К. Б.

Рищенко М. І., д.т.н., професор, завідувач кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей;
☎ +38 066 110 61 43, ✉ ceramkaf@gmail.com

Федоренко О. Ю., д.т.н., проф., професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей;
☎ +38 050 713 03 35, ✉ fedorenko_e@ukr.net

Лісюткіна М. Ю., молодший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей;
☎ +38 066 867 31 35, ✉ lisyutkinamaria@mail.ru

Дайнеко К. Б., к.т.н, науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей;
☎ +38 099 264 56 10, ✉ Caterine@i.ua
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

M. Rishchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Ceramics, Refractories, Glass and Enamels,
☎ +38 066 110 61 43, ✉ ceramkaf@gmail.com

O. Fedorenko, D.Sc., prof., professor of the Technology of ceramics, refractories, glass and enamels Chair,
☎ +38 050 713 03 35, ✉ fedorenko_e@ukr.net

M. Lisyutkina, junior researcher of the Technology of ceramics, refractories, glass and enamels Chair,
☎ +38 066 867 31 35, ✉ lisyutkinamaria@mail.ru

K. Dayneko, Ph.D., researcher of the Chair of technology of ceramics, refractories, glass and enamels;
☎ +38 099 264 56 10, ✉ Caterine@i.ua
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
61002, Kharkov, Kirpichova str, 2

МЕТОДОЛОГІЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ХІМІЧНО І ТЕРМІЧНО СТІЙКИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ХИМИЧЕСКИ И ТЕРМИЧЕСКИ СТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

METHODOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF CHEMICAL AND HEAT RESISTANT CERAMIC MATERIALS

Анотація. Розроблена методологія створення функціональної кераміки на основі нових відомостей щодо сусолідусної будови системи $MgO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$. Визначені умови низькотемпературного синтезу тіаліту та твердих розчинів складу $Mg_{0.3}Al_{1.4}Ti_{1.5}O_5$ та $Mg_{0.6}Al_{0.8}Ti_{1.6}O_5$, сформульовані теоретичні і технологічні принципи проектування хімічно і термічно стійкої кераміки та досліджено структуру і фазовий склад отриманих матеріалів. Розроблені керамічні матеріали за комплексом функціональних властивостей відповідають технічним вимогам до хімічно- та термічно стійких керамічних плиток, а також керамічних насадок для тепломасообмінних апаратів в технології неорганічного синтезу. Показана доцільність використання при їх виготовленні альтернативних сировинних матеріалів – пірофілітових сланців та відходів феротитанового виробництва.

Ключові слова: хімічна і термічна стійкість; тіалітвмісна кераміка; структура та фазовий склад, альтернативна сировина, техногенні матеріали.

Анотация. Разработана методология создания функциональной керамики на основе новых сведений о субсолидусном строении системы $MgO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$. Определены условия низкотемпературного синтеза тиалята и твердых растворов состава $Mg_{0.3}Al_{1.4}Ti_{1.5}O_5$ и $Mg_{0.6}Al_{0.8}Ti_{1.6}O_5$, сформулированы теоретические и технологические принципы проектирования химически и термически стойкой керамики, исследована структура и фазовый состав полученных материалов. Разработанные керамические материалы, которые по комплексу функциональных свойств соответствуют техническим требованиям к химически и термически стойким керамическим плиткам, а также керамическим насадкам для теплообменных аппаратов в технологии неорганического синтеза. Показана целесообразность использования при их изготовлении альтернативных сырьевых материалов – пирофилитовых сланцев и отходов ферротитанового производства.

Ключевые слова: химическая и термическая стойкость; тиалятсодержащая керамика; структура и фазовый состав, альтернативная сырье, техногенные материалы.

Annotation. The methodology of functional ceramics creation on the basis of new information about the subsolidus structure of the $MgO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ system is developed. The conditions for the low-temperature synthesis of tialite and solid solutions of $Mg_{0.3}Al_{1.4}Ti_{1.5}O_5$ and $Mg_{0.6}Al_{0.8}Ti_{1.6}O_5$, are determined, the theoretical and technological principles of the chemically and thermally stable ceramics design are formulated and the structure and phase composition of the obtained materials have been studied. The developed ceramic materials by the complex of functional properties meet the technical requirements for chemically and thermally resistant ceramic tiles, as well as ceramic nozzles for heat-mass-exchange machines in the technology of inorganic synthesis. It is shown the expediency of using of alternative raw materials (pyrophyllite shale and ferrotitanium waste) in the production

Key words: chemical and thermal stability; Tialite-containing ceramics; structure and phase composition, alternative raw materials, man-made materials.

Вступ

Високі темпи розвитку промисловості, інтенсифікація виробничих процесів, підвищення основних технологічних параметрів (температура, тиск, концентрація реагуючих засобів та ін.) висувають високі вимоги до надійної експлуатації будівельних конструкцій та спеціального обладнання. Особливе місце в комплексі заходів щодо забезпечення безперебійної експлуатації устаткування відводиться його надійному захисту від корозії і застосуванню у зв'язку з цим високоякісних хімічно і термічно стійких матеріалів.

Основні збитки від корозії деталей технологічного обладнання пов'язані з псуванням або виходом з ладу самих конструкцій, тому що внаслідок корозії вони втрачають необхідну міцність, герметичність, теплопровідність, електроізоляційні властивості і інші необхідні якості. У зв'язку з цим протикорозійний захист та підвищення надійності керамічних деталей технологічного обладнання, а також довговічності конструкцій та споруд є однією з найважливіших проблем, що має велике значення для народного господарства [1–2].

Аналіз сучасного стану вітчизняної та зарубіжної практики вказує на необхідність вдосконалення існуючих методів антикорозійного захисту, а також розробки та впровадження нових термічно і хімічно стійких матеріалів та ресурсозберігаючих технологій їх отримання. При вирішенні питання антикорозійного захисту керамічних матеріалів та конструкцій з них серйозна увага приділяється комплексному вивченню характеру агресивних впливів з урахуванням умов експлуатації, обґрунтуванню методів для подовження терміну служби конструкцій, споруд та обладнання, які базуються на комплексних дослідженнях та розробках нових матеріалів з підвищеною кислото- і лугостійкістю та здатністю витримувати різкі коливання температур [3–6].

Огляд науково-технічної літератури висвітлив переваги тіалітвмісних керамічних матеріалів з точки зору хімічної і термічної стійкості, однак, враховуючи термічну нестабільність фази $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ (тіаліт зазвичай розкладається на фазоутворюючі оксиди в інтервалі температур 750–1300 °C) [3], доцільним є визначення шляхів для його стабілізації та умов синтезу при температурах до 1300 °C. Це дозволить створити тіалітвмісні хімічно і термічно стійкі керамічні матеріали (ХіТСКМ) при зниженій на 200 °C температурі (у порівнянні з існуючими аналогами), що є необхідною умовою зменшення енергоємності їх виробництва.

Метою роботи є розробка теоретичних основ і технологічних принципів отримання тіалітвмісних ХіТСКМ на основі системи $MgO(CaO) - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ з використанням альтернативної сировини природного і техногенного походження.

Методи та засоби досліджень

Дослідження будови оксидних систем здійснювали із залученням термодинамічного, геометро-топологічного та фізико-хімічного методів. Мінеральний склад природної сировини і фазовий склад промислових відходів, а також розроблених керамічних матеріалів визначали з використанням рентгенофазового аналізу (РФА) на дифрактометрі ДРОН-3М і петрографічних досліджень (мікроскоп МІН-9). Дослідження структури матеріалів проводили методом скануючої електронної мікроскопії (мікроскоп JSM-6390LV) в режимі вторинних електронів; показники відносної пористості визначали за допомогою прикладної програми «ImageJ». Дослідження процесів, що супроводжують випал матеріалів здійснювали із залученням диференційно-термічного аналізу (ДТА) на дериватографі STA-409PC. Для визначення фізико-механічних, теплофізичних і хімічних властивостей отриманих керамічних матеріалів використовували стандартні методи згідно ГОСТ 473.1–81 – ГОСТ 473.11–81 та EN ISO 10545 «Ceramic tiles. Testing methods». Хімічну стійкість кераміки

визначали за показниками кислотостійкості (ГОСТ 473.1–81) та лугостійкості (ГОСТ 473.2–81) за втратою ваги матеріалу після обробки реагентом. Термостійкість зразків кераміки визначали шляхом термоцикування (нагрівання до 350 ± 10 °C, витримка 40 хв і наступне різке водне охолодження до 20 °C). ТКЛР зразків визначали за ГОСТ 10978–80 на ділатометрі ДКВ-5а в інтервалі температур 20–600 °C.

Результати та їх обговорення

На етапі теоретичних досліджень методом термодинамічного аналізу визначено фази, що є інертними по відношенню до дії більшості агресивних середовищ (як кислот, так і лугів) та такі, що здатні забезпечити високу термостійкість виробів при експлуатації в умовах значних температурних коливань, зокрема тіаліт, муліт, периклаз, корунд та кордієрит.

В зв'язку з цим проведені дослідження систем фазоутворюючих оксидів $CaO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ та $MgO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$, на підставі яких уточнено їх субсолідусну будову [7–9]. На підставі аналізу нових відомостей визначено найбільш технологічні області оксидних композицій в дослідних системах, придатних для синтезу ХтаТСКМ при температурі випалу до 1250 °C:

- 1) в системі $CaO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ це область концентрацій тетраедра $A_3S_2 - CAS_2 - AT - S$ з температурою евтектики $T_{евт} = 1678$ К, елементарним об'ємом $\Delta V = 64$ ‰ та ступенем асиметрії $K = 2,8$, в якому співіснують нерозчинні в різних агресивних середовищах фази тіаліту, муліту і корунду;
- 2) в системі $MgO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ положення оксидних композицій обмежено областю концентрацій тетраедра $A_3S_2 - M_2A_2S_5 - AT - S$ (рис. 1) з температурою евтектики $T_{евт} = 1673$ К, елементарним об'ємом $\Delta V = 97$ ‰ та ступенем асиметрії $K = 1,98$, який дозволить синтезувати керамічні матеріали, що містять фази з низьким ТКЛР і високою хімічною стійкістю (тіаліт, муліт та кордієрит).

Аналіз положення точок композицій, розташованих в межах дослідного тетраедра (рис. 1в), свідчить про те, що для реалізації принципів енергозбереження при виготовленні ХіТСКМ, необхідно визначити вид та кількість добавок, які дозволять істотно знизити температуру утворення розплаву для забезпечення рідкофазового спікання кераміки та здійснити спрямований синтез хімічно стійких кристалічних фаз, зокрема тіаліту і муліту.

На етапі експериментальних досліджень розглянуто можливість заміни традиційної сировини при виготовленні ХіТСКМ альтернативними природними і техногенними матеріалами, зокрема, пірофілітовими сланцями (супутніми породами видобування кварцитів Овруцького родовища) та відходами феротитанового виробництва (ВФТВ) [10–12]. Дослідження складу ВФТВ показали, що до

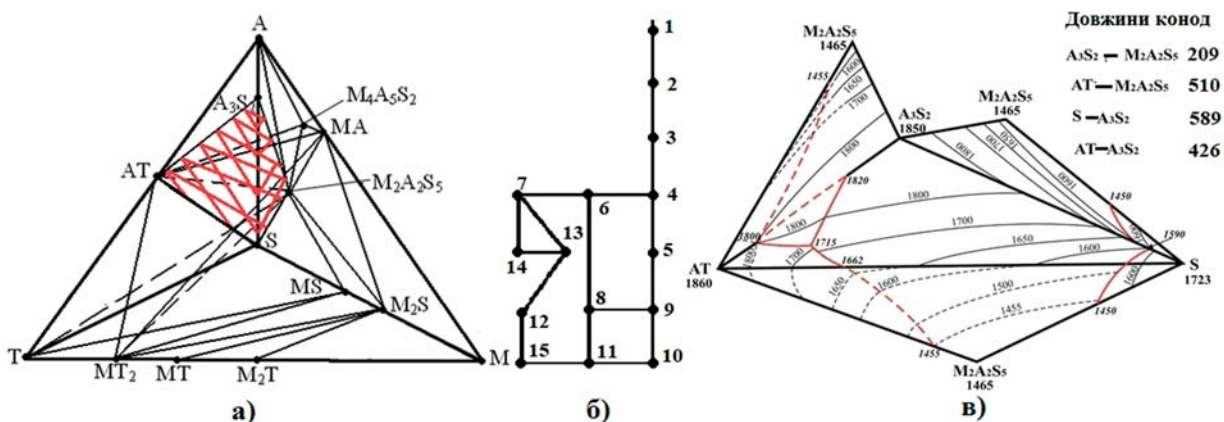


Рис. 1. Субсолідусна будова системи $MgO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ в інтервалі температур від 1173 до 1659 К: а) тетраедрація системи; б) топологічний граф; в) розгортка елементарного тетраедру $A_3S_2 - AT - M_2A_2S_5 - S$

його складу входять переважно фази рутилу TiO_2 (20 мас. %) та корунду $\alpha-Al_2O_3$ (78,7 мас. %). В незначній кількості міститься також гематит $\alpha-Fe_2O_3$ (1,3 мас. %). Завдяки цьому використання ВТФВ як джерела фазоутворюючих оксидів для синтезу тiаліту у складі сировинних композицій надасть керамічним матеріалам високої хімічної і термічної стійкості. Дослідженнями пірофілітових сланців з використанням ДТА та РФА визначено хіміко-мінеральний склад та досліджено процеси, що супроводжують їх термообробку. Встановлено, що при нагріванні пірофілітових сланців в інтервалі температур $960 \div 990^\circ C$ відбувається синтез муліту, який здатний надати готовому матеріалу хімічної стійкості та механічної міцності.

Хімічний склад використаних в роботі сировинних матеріалів подано в табл. 1.

На основі обраних композицій системи $MgO(CaO) - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ спроектовані маси в яких для синтезу комплексу заданих фаз $AT+A_3S_2$ та $AT+M_2A_2S_5$ збережено співвідношення фазоутворюючих оксидів відповідно до стехіометричного складу сполук вказаних фазових композицій. Завдяки використанню інтенсификатора спікання (свинцевого глету $PbO=1,5$ мас. %) отримані при температурі випалу $1250^\circ C$ керамічні матеріали характеризуються максимальним рівнем спікання (водопоглинання $W = 0$ %). Експлуатаційні властивості розроблених ХТСКМ представлені на рис. 2.

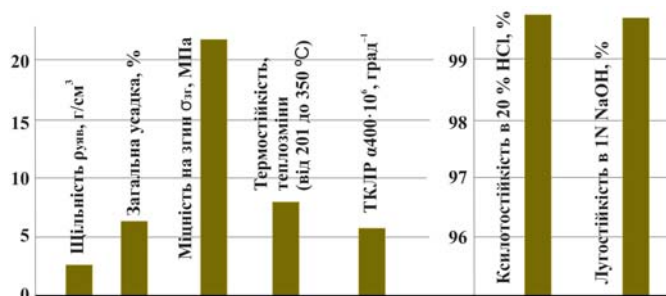


Рис. 2. Експлуатаційні властивості керамічних матеріалів, випалених при температурі $1250^\circ C$

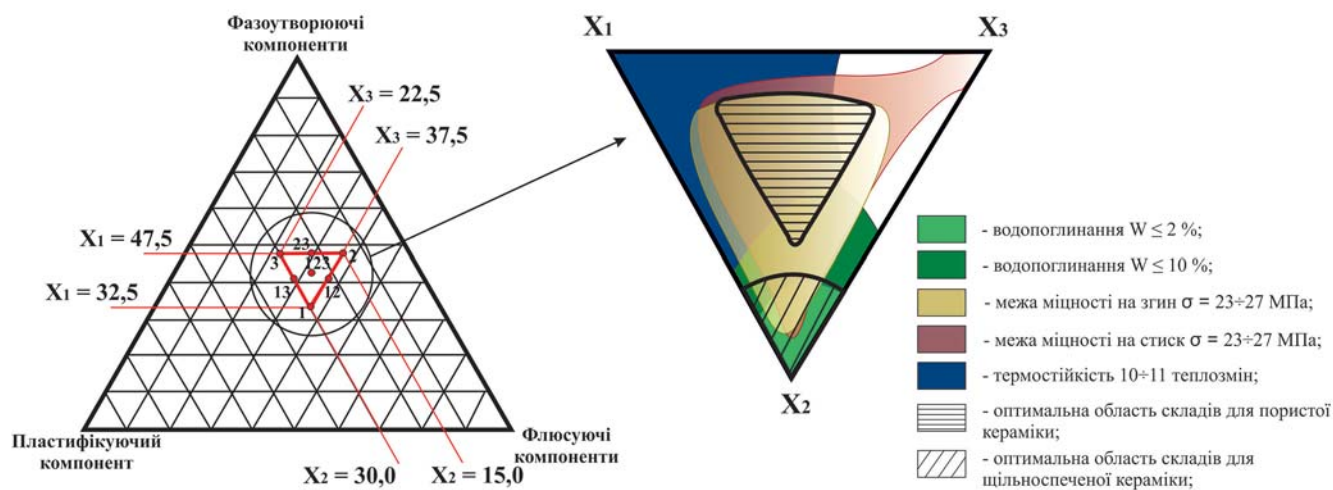


Рис. 3. Область факторного простору та межі варіювання компонентів у складі сировинних сумішей, мас. %: X_1 – фазоутворюючих; X_2 – пластифікуючих; X_3 – флюсуючих

З використанням РФА встановлено, що фазовий склад ХТСКМ містить твердий розчин із структурою тiаліту, склад якого змінюється від $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ до $Mg_{0,6}Al_{0,8}Ti_{1,6}O_5$ при використанні як альтернативної сировини ВТФВ та пірофілітових сланців відповідно. Показано, що формування тiалітового твердого розчину відбувається при введенні ВТФВ (до ~ 30 мас. %) або застосуванні пірофілітових сланців (до 20 мас. %). Натомість в разі заміни ВТФВ і пірофілітових сланців на глину Веско-Екстра, глинозем і титанові білила утворення $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ не відбувається. Зроблено припущення, що утворення тiалітових твердих розчинів відбувається за рахунок ізоморфної часткової заміни іонів Al^{3+} на Mg^{2+} в кристалічній решітці тiаліту за наявності в масі оксидів MgO і Fe_2O_3 .

З залученням методу ПФЕ типу 2^2 визначено вплив співвідношення оксидів $MgO : TiO_2$ на синтез тiалітових твердих розчинів; встановлено, що утворення розчинів типу $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ та $Mg_{0,6}Al_{0,8}Ti_{1,6}O_5$ можливе вже при температурі $1200^\circ C$ за умови збереження співвідношення $MgO:TiO_2 = 0,18$.

Враховуючи це, із залученням симплекс-решітчатого планування експерименту (метод неповного третього порядку) проведена оптимізація складів мас ХтаТСКМ. Як параметри оптимізації розглядали експлуатаційні властивості керамічних матеріалів, які обумовлюють їх функціональність: водопоглинання (W), міцність на стиск ($\sigma_{ст}$) та згин ($\sigma_{зг}$), термостійкість ($ТС$) і ТКЛР (α), кислотостійкість ($КС$) і лугостійкість ($ЛС$). Для збереження співвідношення $MgO : TiO_2 = 0,18$ вміст випаленого магнетиту і титанових білил був сталий і складав 4,5 мас. % (понад 100 % на суху речовину) та 25 мас. % відповідно.

Область дослідного факторного простору (рис. 3) обмежена таким вмістом компонентів технологічних сумішей:

- фазоутворюючі (7,5÷22,5 мас. % ВТФВ + 25 мас. % титанові білила);
- пластифікуючі (15÷30 мас. % глина Веско-Екстра);
- флюсуючі (21÷36 мас. % Новогнатівський пегматит + 1,5 мас.% PbO).

Хімічний склад сировинних матеріалів

Таблиця 1.

Назва матеріалу	Вміст компонентів, мас. %									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PbO	в.п.п.
Глина марки Екстра АТЗТ «Веско»	53,22	30,25	0,80	1,41	0,44	0,53	0,49	1,86	–	11,00
Овруцькі пірофілітові сланці ГЗК «Кварцит»	64,6	22,70	5,70	0,92	0,09	0,05	0,05	0,32	–	5,57
Новогнатівській пегматит	73,62	14,36	0,63	0,62	0,00	0,10	3,42	6,03	0,00	1,22
Титанові білила	–	–	–	100	–	–	–	–	–	–
Магнетит технічний випалений	5,6	0,7	–	–	3,7	86,6	–	–	–	0,8
Свинцевий глет	–	–	–	–	–	–	–	–	100	–
Шлак феротитановий ТОВ НПП«МАТЕКО»	–	78,7	1,3	20,0	–	–	–	–	–	–

За результатами аналізу результатів експерименту отримані математичні моделі, які адекватно описують залежності «склад – властивість» для розроблених ХІТСКМ та визначено оптимальний склад сировинних композицій (мас. %) для отримання:

- щільноспечених ХІТСКМ – вміст складових мас знаходиться в межах, мас. %: фазоутворюючих – 32÷35; пластифікуючих – 25÷28; флюсуючих компонентів – 37÷40;
- пористих ХІТСКМ з підвищеною міцністю – склади мас належать до області, обмеженої вмістом фазоутворюючих – 37÷41; пластифікуючих – 19÷23; флюсуючих компонентів – 31÷35.

Матеріали, виготовлені з використанням наданих рекомендацій, характеризуються наступними властивостями:

- щільноспечені ХІТСКМ – $W = 0,15\%$; $\sigma_{зр} = 23$ МПа; $\sigma_{ст} = 100$ МПа; КС = 99,32 % (клас УНА); ЛС=99,99 % (клас УНА); ТС ≥ 8 циклів; $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$;
- пористі міцні ХІТСКМ – $W = 11,62\%$; $\sigma_{зр} = 27$ МПа; $\sigma_{ст} = 110$ МПа; КС = 99,99 % клас УНА; ЛС = 99,99 % (клас УНА); ТС ≥ 10 циклів; $\alpha = 3,0 \cdot 10^{-6}$, град $^{-1}$.

Якісний фазовий склад розроблених ХІТСКМ за даними РФА представлений на рис. 4. Порівняльний аналіз хімічного та фазового складів обох матеріалів дозволив зробити висновок, що для отримання тіалітвмісної кераміки необхідно збереження співвідношення $TiO_2 : Al_2O_3 \sim 1,4$ за умови надлишкового вмісту TiO_2 . Із зменшенням вмісту TiO_2 у складі мас (при співвідношенні $TiO_2/Al_2O_3 \leq 1,17$) при температурі випалу 1250 °С у матеріалі разом із тіалітовою фазою утворюється муліт, присутність якого збільшує міцність кераміки навіть за наявності значної поруватості.

Ці спостереження дозволяють припустити можливість керувати процесом фазоутворення кераміки за рахунок впливу на формування тіалітової та мулітової фаз шляхом варіювання вмісту оксидів титану та алюмінію у складі керамічної маси, що надає можливості спрямовано змінювати фазовий склад ХІТСКМ з метою поси-

лення певних функціональних властивостей матеріалів, виходячи з умов експлуатації виробів з них.

Дослідження структури розроблених ХІТСКМ показали, що із збільшенням вмісту ВТВФ в межах дослідних концентрацій відносна пористість матеріалів зростає з 20% до 50 %. На рис. 5 подані SEM-зображення розроблених ХІТСКМ при різному збільшенні.

Як видно з рис. 5, у складі щільноспеченого ХІТСКМ (рис. 5а) чітко розрізняється аморфна складова матеріалу (склофаза), яка огортає кристали та заповнює дрібні пори, що забезпечує низький показник водопоглинання матеріалу ($W = 0,15\%$). Натомість в поруватому ХІТСКМ чітко видні пороти неправильної форми розміром 15÷20 мкм, які утворені скупченням дрібних пор, що сполучаються. Це пояснює високу відносну пористість матеріалу та дозволяє припустити здатність цього матеріалу пропускати рідини та газу. Подальші дослідження підтвердили це припущення: швидкість дифузії води в товщу зразка складає $1,88 \cdot 10^{-5}$ см 2 /с, коефіцієнт сорбції води дорівнює 2,87, коефіцієнт проникності матеріалу становить $5,39 \cdot 10^{-5}$ см 2 /с, кількість поглинутої за 30 хв води до повного насичення зразку 0,63 г.

Проведені комплексні дослідження структури і фазового складу розроблених ХІТСКМ довели можливість отримання тіалітвмісної кераміки при зниженій на у порівнянні з відомими аналогами температурі випалу (1250 °С). Наявність кислото та лугостійкої фази тіаліту, що відізняється низьким ТКЛР ($\alpha = -1,90 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$) забезпечує високу термостійкість та рівновелику кислото- і лугостійкість розроблених керамічних матеріалів. Промислові випробування розроблених ХІТСКМ, проведені в умовах дослідного виробництва ТОВ НПП «ДОМІНАНТА», показав, що розроблені тіалітвмісні керамічні матеріали за комплексом функціональних властивостей відповідають технічним вимогам для хімічно- та термічно стійких керамічних плиток і хімічно стійких керамічних насадок згідно ДСТУ Б В.2.7-256:2011 та ГОСТ 17612-89.

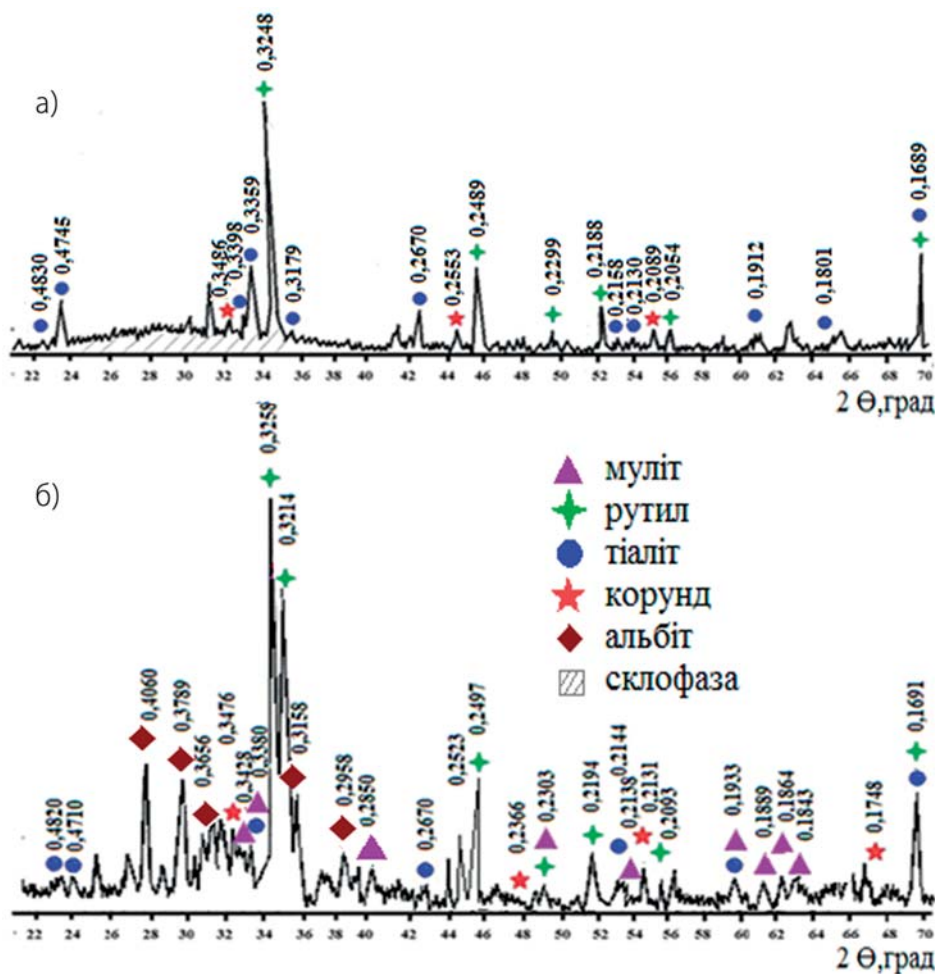


Рис. 4. Рентгенограми розроблених ХІТСКМ: а) щільноспечених; б) поруватих

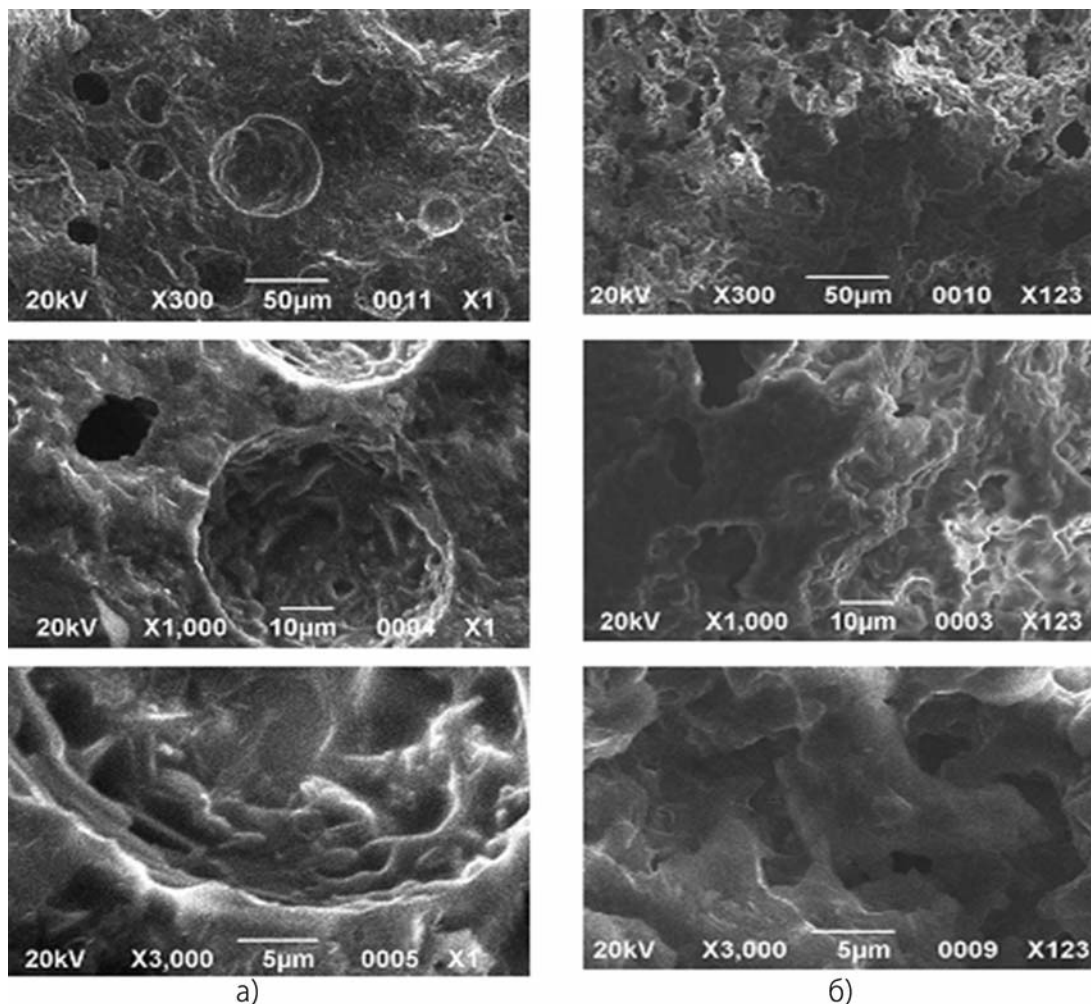


Рис. 5. SEM-знімки розроблених ХІТСКМ: а) щільноспечених; б) поруватих

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблені теоретичні і технологічні принципи отримання хімічно і термічно стійкої кераміки при температурі до 1250 °С та показана перспективність використання пірофілітових сланців та відходів ферротитанового виробництва як альтернативної сировини у виробництві тіалітвмісної кераміки з високою термічною та хімічною стійкістю до дії кислих та лужних розчинів. За експлуатаційними властивостями розроблені керамічні матеріали задовольняють вимоги, що висуваються до хімічно- та термічно стійких керамічних плиток і

насадок, призначених для заповнення тепломасообмінних колон та абсорберів, які використовують в технології неорганічного синтезу. Використання альтернативної природної і техногенної сировини дозволяє знизити собівартість продукції за рахунок повної або часткової заміни високовартісних технічних продуктів (титанових білил, глинозему) при збереженні високого рівня функціональних властивостей виробів, а також поліпшити ситуацію в промислових регіонах країни, пов'язану з нагромадженням відходів відповідних гірничовидобувних та металургійних виробництв.

Література:

1. Гаршин А. П. Керамика для машиностроения / [А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семенов]. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 384 с.
2. Евдокимов В. Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов / В. Д. Евдокимов, Л. П. Клименко, А. Н. Евдокимова. – К.: Професионал, 2006. – 352 с.
3. Волочко А. Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А.Т. Волочко, К.Б. Подболотов, Е.М. Дятлова. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 385 с.
4. Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and properties: 2 edition / Chief editor S. Shigeyuki // Academic Press, 2013. – 1258 p.
5. Подболотов К. Б. Керамические кордиеритсодержащие термостойкие материалы технического назначения / [К. Б. Подболотов, А. Т. Волочко, Е. М. Дятлова, Д. Н. Яшеня] // Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы. – Минск: Беларус навука, 2013. – С. 248–259.
6. Сорокина Е. В. Исследование синтеза муллито-тиалитовых огнеупорных материалов / Е. В. Сорокина, Д. В. Прутцков, Л. В. Сорокина // Металургия. – 2011. – Вып. 24. – С. 91–97.
7. Ryschenko M. I. Subsolidus conceptual design of CaO – Al₂O₃ – TiO₂ – SiO₂ system and its significance for manufacturing advanced ceramics / [M. I. Ryschenko, Ya. N. Pitak, E. Yu. Fedorenko, M. Yu. Lisyutkina, A. V. Shevtsov] // China's refractories. – Henan, Jan. – Mar, 2016. – Vol. 25, No. 1. – PP. 44–52.
8. Smart R. M. The subsolidus phase equilibria and melting temperature of MgO – Al₂O₃ – SiO₂ Composition / R. M. Smart, F. P. Glasser // Ceramic International. – 1981. – 7, N 3. – P. 9–97.
9. Бережной А. С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы / А. С. Бережной. – Киев: Наукова думка. – 1988. – 200 с.
10. Кислотостойкая керамика на основе пирофиллитовых пород Украины / [М. И. Рыщенко, Е. Ю. Федоренко, М. Ю. Лисюткина и др.] // Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности : Междунар. науч.-техн. конф., 28–29 апреля 2015 г.: текст докл. – Харьков, 2015. – С. 65–66.
11. Розширення сировинної бази виробництва кислотостійкої кераміки / [О. Ю. Федоренко, М. І. Рищенко, Л. С. Коц и др.] // 36. наук. пр. ПАТ «УкрНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного». – 2013. – № 113. – С. 171 – 178.
12. Разработка составов масс конструкционной керамики с использованием отходов ферротитанового производства / [М. И. Рыщенко, Е. Ю. Федоренко, М. Ю. Лисюткина и др.] // Экология и промышленность. – Харьков. – 2015. – № 4 (45). – С. 82–87.