

*Д-р техн. наук М. І. Рищенко, д-р техн. наук О. Ю. Федоренко,
М. Ю. Лісюткіна, О. В. Шевцов, К. В. Білогубкіна, Н. М. Регеда
(НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
Україна)*

Закономірності фазоутворення, структура та властивості хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів

Вступ

Хімічно та термічно стійкі керамічні матеріали (ХтаТСКМ) є незамінними для виробництв хімічної галузі промисловості. Такі матеріали використовують для виготовлення деталей насосів для перекачування агресивних рідин, тиглів для плавки проб для термічного аналізу, керамічних насадок теплообмінних колон у технології неорганічного синтезу, газодифузійних труб, футеровочних матеріалів резервуарів, кислотних башт тощо [1–3]. Технологія виготовлення існуючих видів ХтаТСКМ, зокрема твердого та силікатного фарфору, корундової, мулітокорундової керамік, є однією з найбільш енергоємних, оскільки передбачає тривалий випал за температури понад 1300 °С [4]. Пріоритетним напрямом розвитку технології нової функціональної кераміки є зниження витрат на паливні та сировинні матеріали при забезпеченні високої якості готових виробів та підвищенні ресурсу їх експлуатації [5, 6].

Хімічна стійкість є однією з основних властивостей кераміки, яка визначає її придатність як конструкційного матеріалу для виготовлення обладнання, що працює в агресивних середовищах. Хімічна стійкість кераміки визначається в першу чергу природою взаємодіючих фаз, їх хімічним складом і підпорядковується загальновідомим хімічним законам кінетики гетерогенних процесів. Види корозійного руйнування вельми різноманітні і залежать переважно від структурних особливостей кераміки та її фазового складу. Швидкість процесів хімічної корозії керамічних матеріалів залежить як від параметрів агресивного реагенту (температури, концентрації, тиску), так і від структурних особливостей кераміки, тобто якісних та кількісних характеристик пористості, стану поверхні, ступеня кристалічності, взаємного розподілу кристалічних та аморфної фаз [7].

Кислото- та лугостійкість керамічних матеріалів визначається стабільністю їх складових (кристалічних фаз та склофаз) в концентрованих розчинах кислот та лугів. Можливість протікання тієї чи іншої реакції, як відомо, визначається знаком енергії Гіббса. В результаті термодинамічних розрахунків авторами робіт [8, 9] отримані дані, що дозволяють здійснювати порівняльний аналіз хімічної стійкості ряду сполук, зокрема муліту, корунду, циркону, а також усіх модифікацій кварцу, по відношенню до кислих і лужних розчинів (HCl, HF, NaOH).

Актуальність створення нових видів ХтаТСКМ з комплексом заданих функціональних властивостей обумовлена необхідністю розробки енерго- та ресурсозберігаючої технології ХтаТСКМ, підвищення ресурсу експлуатації виробів та розширення області їх використання, доцільністю використання додаткових техногенних ресурсів як альтернативної сировини.

Технологічні рішення, які забезпечують підвищення ефективності виробництва ХтаТСКМ, мають базуватися на розробці принципів регулювання структури та фазового складу матеріалів на основі відомостей про фазові рівноваги в базових системах оксидів, визначенні фізико-хімічних закономірностей процесів спікання та фазоутворення кераміки із заданими властивостями, а також на визначенні та реалізації резервів енерго- та ресурсозбереження.

Метою роботи є розробка сировинних композицій ХтаТСКМ при використанні альтернативної сировини природного й техногенного походження та визначення фізико-хімічних закономірностей структуро- та фазоутворення муліто-гіалітової кераміки з високим рівнем хімічних і фізико-механічних властивостей в умовах енергоощадних режимів випалу.

Експериментальна частина

При розробці керамічних мас використовували вітчизняну природну і технічну сировину, а також пірофілітвмісні відходи видобування кварцитів (ПВВК) ПАТ «Овруцький ГЗК «Кварцит» та відходи феротитанового виробництва (ВФТВ) ТОВ НПП «МАТЕКО» (табл. 1).

Визначення складу й властивостей мінеральної та техногенної сировини проводили із залученням диференційно-термічного (STA-409PC) і рентгенофазового (SHIMADZU XRD-6000) методів аналізу. При розробці сировинних композицій використовували повнофакторний (ПФЕ 2²) та симплекс-ґратчастий плани.

Властивості зразків визначали згідно зі стандартами ГОСТ 473.1-11—81 із залученням приладів для експрес-контролю відкритої пористості та уявної щільності матеріалів, лабораторного обладнання для визначення показників міцності (прес ГМС-50, прилад МП-100) та дилатометру ДКВ-5а. Дослідження проникної здатності керамічних матеріалів проводили за температури $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ шляхом занурення зразків у дистильовану воду з витримкою у воді та наступним циклічним зважуванням. Інтегральний коефіцієнт дифузії розраховували з кінетичних ділянок кривих поглинання із застосуванням больцманівського рівняння другого закону Фіка [10] у випадку $\frac{M_t}{M_\infty} \leq 5$:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{\delta} \left(\frac{D \cdot t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де M_t — кількість води, що поглинена матеріалом за час t , г; M_∞ — рівноважна кількість поглинутої води, г; δ — товщина зразка, см; D — коефіцієнт дифузії води, $\text{см}^2/\text{с}$.

Таблиця 1

Хімічний склад сировинних матеріалів

Сировинні матеріали	Вміст компонентів, мас. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	PbO	в.п.р.
Глина марки Екстра (АТЗТ «Веско»)	53,22	30,25	0,80	0,44	1,41	0,53	1,86	0,49	—	1,00
Новоґнаївський пегматит марки ПТ ТУ-14.5.-05468498-005-2004	73,73	14,30	0,63	0,62	—	0,10	6,00	3,40	—	1,22
Діоксид титану марки SumTITAN R-208 ПАТ «Суміхімпром»	—	0,1	—	—	99,9	—	—	—	—	—
Випалений магнезит марки DTMS 85 ТОВ «Група «Магнезит»	5,75	0,71	—	3,8	—	88,92	—	—	—	0,82
Свинцевий глет марки ГІ (ГОСТ 5539—73)	—	—	—	—	—	—	—	—	99,8	0,2
Глинозем металургійний марки Г-00 ГОСТ 6912—87	0,03	98,70	0,02	—	—	—	—	0,25	—	1,0
Пірофілітвмісні відходи видобування кварцитів	65,30	22,95	5,58	0,09	0,93	0,05	0,05	0,32	—	4,73
Відходи феротитанового виробництва	—	78,7	1,3	—	20,0	—	—	—	—	—

Параметри сорбційних процесів розраховували, аналізуючи експериментальні дані в координатах $M_t / M_\infty - t^{1/2}$. Коефіцієнт дифузії води (D) з похибкою, яка не перевищує 0,001 %, розраховували за формулою:

$$D = 0,049 \cdot \frac{\delta^2}{t}, \quad (2)$$

де δ — товщина зразка; t — момент часу, що визначається співвідношенням $\frac{M_t}{M_\infty} = 0,5$.

Коефіцієнт сорбції води (σ) визначали за рівнянням:

$$\sigma = \frac{M_{\max} - M_0}{V \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (3)$$

де M_{\max} — маса керамічного зразка при сорбційній рівновазі, г; M_0 — початкова маса зразка, г; V — об'єм зразка, см³; $C_{\text{H}_2\text{O}}$ — концентрація води в розчині, моль/л.

Коефіцієнт проникності (P) розраховували із співвідношення:

$$P = D \cdot \sigma, \quad (4)$$

де D — коефіцієнт дифузії води; σ — коефіцієнт сорбції води.

При дослідженні масопереносу іонів зразки пористої кераміки вивчали, вміщуючи зразки як фільтруючу мембрану, що розділяє розчини перманганату калію (KMnO_4) чи біхромату калію ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) і воду, якими заповнені відділення уніфікованої ґратки. Коефіцієнт дифузії $D_{\text{іон}}$ розраховували за формулою:

$$D_{\text{іон}} = \frac{\delta^2}{\tau_{\text{н}}}, \quad (5)$$

де δ — товщина зразка; $\tau_{\text{н}}$ — час непроникності, який дорівнює відрізка, що відсікається на осі абсцис дотичною до кінетичного проміжку сорбційної кривої, с.

Фазовий склад отриманих матеріалів та особливості їх структури досліджували з використанням дифрактометра ДРОН-3М та скануючого електронного мікроскопу *JSM-6390LV*.

Вибір заданого фазового складу ХтаТСКМ ґрунтувався на термодинамічному аналізі реакцій основних кристалічних фаз керамічних матеріалів (зокрема корунду ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), цельзіану ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), сподумену ($\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$), периклазу (MgO), шпінелі (MgAl_2O_4), тіаліту (Al_2TiO_5), кордієриту ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) та муліту ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) з неорганічними кислотами та лугами в інтервалі температур 323—573 К [11]. Результати досліджень свід-

чать про те, що з усіх розглянутих кристалічних фаз лише гіаліт за нормальних умов є інертним до дії кислот HCl , H_2SO_4 , HNO_3 і HF , але з підвищенням температури понад 100°C починається взаємодія цієї фази з фтороводневою кислотою. Муліт демонструє інертність по відношенню до кислих (HCl , H_2SO_4) та лужних розчинів (NaOH , KOH), а також їх парів за температури до 300°C . Кордієрит та корунд є стійкими лише по відношенню до HCl , NaOH та KOH ,

цельзіан — лише до лугів, а периклаз та шпінель — тільки до розчинів HCl . Натомість сподумен вступає у взаємодію зі всіма розглянутими хімічними реагентами, про що свідчать від'ємні значення енергії Гіббса відповідних реакцій. Тому ця сполука не може надати керамічним матеріалам хімічної стійкості у відношенні до жодного з розглянутих реагентів. Проведені дослідження дозволили обрати гіалітову та мулітову фази як основу для синтезу ХтаТСКМ.

У подальшому з урахуванням уточнених у роботі [12] даних щодо субсолідусної будови системи $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ обрано область

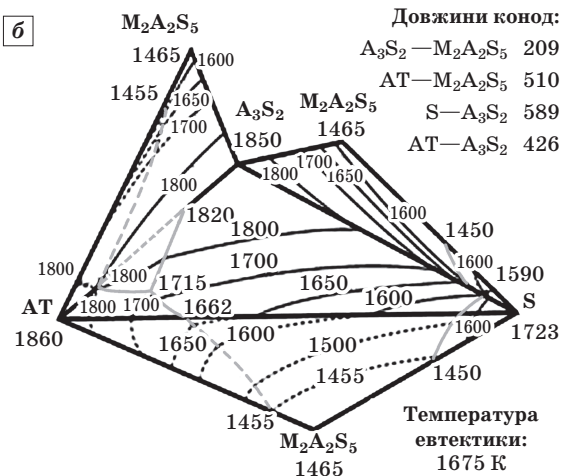
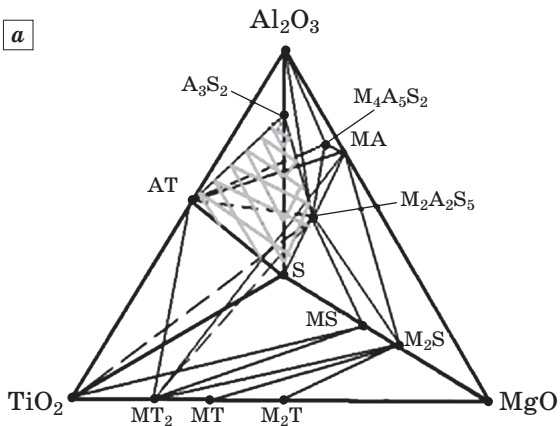


Рис. 1. Субсолідусна будова системи $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ в інтервалі температур $1173-1659\text{ K}$: а — тетраедрація системи; б — розгортка елементарного тетраедру $\text{A}_3\text{S}_2-\text{AT}-\text{M}_2\text{A}_2\text{S}_5-\text{S}$

оксидних композицій для розробки ХтаТСКМ у межах елементарного тетраедру $A_3S_2-M_2A_2S_5-AT-S$ (рис. 1) з найнижчою з-поміж інших температурою евтектики, який включає хімічно стійкі фази тіаліту, муліту, кордіериту та кварцу. Область оксидних композицій, обраних для досліджень, знаходиться в межах концентрації оксидів, мас. %: $MgO - 2-5$, $Al_2O_3 - 15-20$; $TiO_2 - 4-10$; $SiO_2 - 70-75$.

Аналіз положення точок композицій, розташованих в межах дослідного тетраедра, свідчить про те, що для реалізації принципів енергозбереження при виготовленні ХтаТСКМ необхідно визначити вид та кількість добавок, які дозволять досягнути істотного зниження температури утворення розплаву та здійснити спрямоване регулювання синтезу хімічно стійких кристалічних фаз.

Результати та їх обговорення

Як основу для досліджень обрано масу, яка містить мас. %: глину каолініто-гідрослюдисту — 45,44; магнезит технічний — 2,8; технічний глинозем — 20,20; діоксид титану — 29,7; свинцевий глет — 1,5 та забезпечує отримання керамічного матеріалу муліт-тіалітового складу з нульовою відкритою пористістю, границею міцності при стисненні 164 Н/мм^2 , високою кислото- та лугостійкістю (відповідно $KC = 99 \%$ та $ЛС = 99,99 \%$ за ГОСТ 17612—89). Дослідження впливу сировинних матеріалів на фазовий склад та властивості ХтаТСКМ здійснювали шляхом заміни глини на ПБВК та технічного глинозему і діоксиду титану — на ВФТВ. Зразки виготовляли пластичним формуванням та випалювали за температури $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Отримані матеріали характеризувались відсутністю відкритих пор ($P_{\text{відкр.}} = 0 \%$), низьким ТКЛР ($2,69 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), високою термостійкістю (понад 10 циклів від 350 до $20 \text{ }^\circ\text{C}$), хімічною стійкістю ($KC = 98,23 \%$, $ЛС = 100 \%$) та границею при стисканні $89,9 \text{ Н/мм}^2$.

Рентгенофазовий аналіз продуктів випалу показав, що введення до складу мас техногенної сировини (ВФТВ та ПБВК) позначається на інтенсивності основних рефлексів кристалічних фаз, утворених при випалі технологічних сумішей. Так, при заміні глинозему і діоксиду титану на ВФТВ спостерігається збільшення головних рефлексів основних фаз: тіаліту та муліту. В свою чергу, при заміні глини на ПБВК відбувається утворення муліту, кордіериту і тіалітового твердого розчину складу $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$. При цьому помітно зменшується інтенсивність

інших ідентифікованих фаз: рутилу, корунду та кварцу, які є залишками оксидів, що не вступили до реакцій. Таким чином, результати досліджень свідчать про інтенсифікацію процесів утворення фаз муліту, тіаліту, а також його твердих розчинів, які обумовлюють функціональні властивості ХтаТСКМ. Встановлено також, що введення обох відходів до складу маси забезпечує утворення оптимального фазового складу кераміки, про що свідчать її властивості.

Слід зазначити, що підвищення вмісту непластичної складової мас (понад 30 %) унеможлиблює отримання матеріалів шляхом екструзії та вимагає використання тимчасової зв'язки при напівсухому формуванні напівфабрикатів. Крім того, повна заміна глинистого компонента мас на ПВВК негативно позначається на властивостях кераміки через суттєве збільшення відкритої пористості (до 27 %).

Удосконалення складу мас здійснювали з використанням математичних методів планування експерименту. Аналіз даних ПФЕ типу 2^2 дозволив дослідити вплив співвідношення оксидів $MgO : TiO_2$ на синтез твердого розчину $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ та визначити оптимальне співвідношення випаленого магнетиту до діоксиду титану у складі сировинних композицій. Встановлено, що при збереженні співвідношення оксидів $MgO : TiO_2 = 0,18$ утворення $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ відбувається вже за температури $1200\text{ }^\circ\text{C}$, що доводить можливість отримання тіалітвмісних ХтаТСКМ за зниженої температури випалу [13]. Імовірний механізм утворення фази $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ полягає у частковій заміні іонів Al^{3+} на Mg^{2+} за наявності оксиду Fe_2O_3 , який вводиться до маси із ВФТВ і, згідно з роботою [14], виконує роль мінералізатора. Утворення твердих розчинів сприяє стабілізації тіалітової фази, яка, як відомо, є нестійкою за температури до $1300\text{ }^\circ\text{C}$ [15]. Також встановлено, що при зменшенні у складі кераміки вмісту TiO_2 і збереженні співвідношення $TiO_2 : Al_2O_3 \geq 1,17$ разом із тіалітовою фазою утворюється муліт.

В подальшому з використанням симплекс-ґратчастого планування визначені склади сировинних композицій (рис. 2, а), які забезпечують заданий комплекс експлуатаційних властивостей ХтаТСКМ (високу кислото- та лугостійкість, термостійкість та міцність (табл. 2)). З використанням РФА у фазовому складі щільноспеченого керамічного матеріалу, отриманого за температури $1250\text{ }^\circ\text{C}$, встановлено наявність тіаліту як основної фази. Отримані дані свідчать про можливість стабілізації тіаліту за умови збереження співвідношення $TiO_2 : Al_2O_3 \sim 1,4$

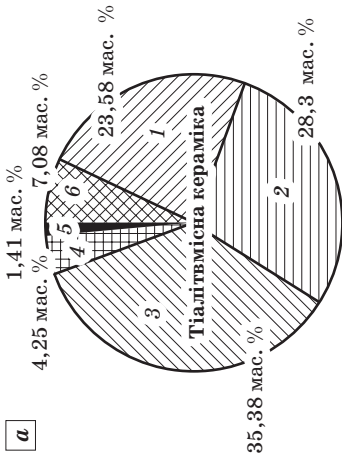
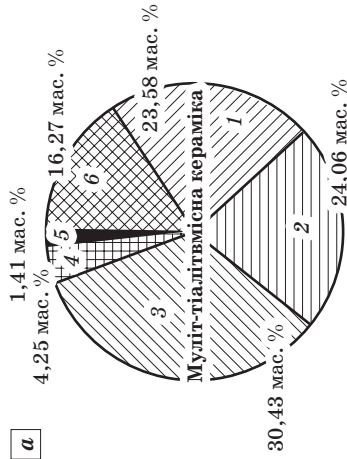
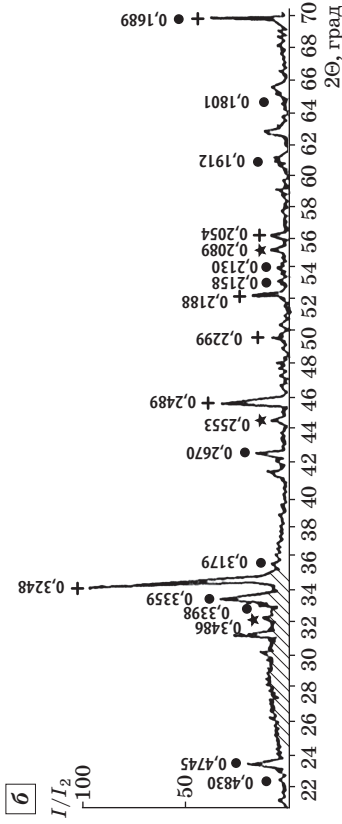
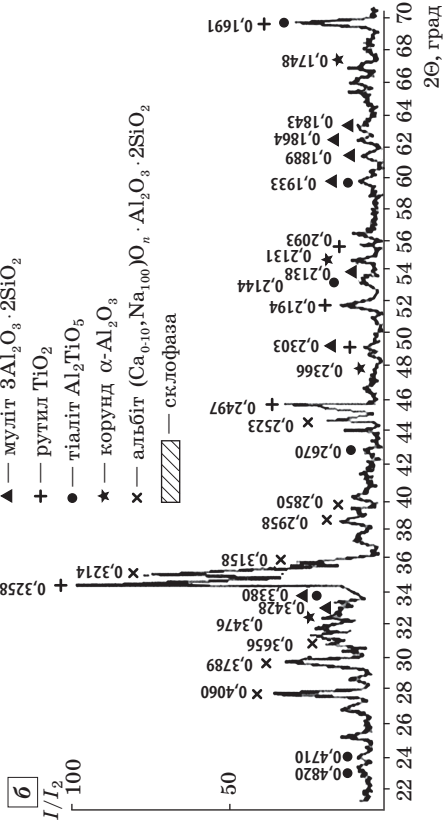
а**а****б****б**

Рис. 2. Склад розроблених керамічних матеріалів: а — шихтовий; б — фазовий

1 — ВФТВ
 2 — діоксид титану
 3 — випалений магнезит
 4 — глина
 5 — перматит
 6 — свинцевий глет

Властивості розроблених ХтаТСКМ та існуючих аналогів

Властивості	Щільноспечені ХтаТСКМ			Поруваті ХтаТСКМ	
	розроблений матеріал	кислототривка плитка*	вироби з силіцевого фарфору (С110)**	розроблений матеріал	вироби з пористого кордієриту (С511)**
Температура випалу, °С	1250	1300	1280—1300	1250	1300
Відкрита пористість, %	0,15	3,5	0,1	11,62	—
Уявна щільність $\rho_{\text{уяв}}$, кг/м ³	2480	—	2200	2030	1900
Загальна пористість, %	0,41	6,65	0,25	60	55—65
Кислотостійкість КС, % (20 % НСl)	99,4	97,0	Стійкий	99,99	Стійкий
Лугостійкість ЛС, % (1N NaOH)	99,98	—	Стійкий	99,99	Стійкий
Границя міцності при стисненні $\sigma_{\text{ст}}$, Н/мм ²	100	40	—	115	100—150
Границя міцності при згині $\sigma_{\text{зг}}$, Н/мм ²	23	28	50	27	25
Термостійкість ТС, теп-лозмін (охолодження від 350 до 20 °С у воді)	8	5	7	10	8
ТКЛР $\alpha \cdot 10^6$, град ⁻¹	4,5	—	4—7	2,97	4—6

* За даними виробника ТОВ «ПромКераміка», Російська Федерація (ГОСТ 961—89).

** За даними виробника Rauschert GmbH Technische Keramik & Kunststoff-Formteile, Німеччина.

та введення відходу ВТВФ, що містить 1,3 мас. % Fe₂O₃, як мінералізуючу складову.

Високі показники хімічної стійкості тїалітвмісної кераміки (КС = 99,99 % ; ЛС = 100%) обумовлені присутністю в матеріалі тїалітової фази та склофази, збагаченої SiO₂, про що свідчить гало значної площі на рентгенограмі (рис. 2, б) та розрахунки її хімічного складу за даними петрографічних досліджень.

Натомість на рентгенограмі муліт-тїалітвмісної кераміки гало майже відсутнє, що вказує на обмежену кількість розплаву, необхідного для ущільнення матеріалу, який за експериментальними даними характеризується відносно високою пористістю ($\Pi_{\text{відкр}} = 11,62\%$; $\Pi_{\text{заг}} = 60\%$). Втім додатковий синтез мулітової фази забезпечує збільшення механічної міцності поруватого

ХтаТСКМ. Ці спостереження свідчать про можливість впливати на процеси формування тіалітової та мулітової фаз в умовах низькотемпературного випалу, спрямовано змінювати фазовий склад ХтаТСКМ для посилення певних функціональних властивостей матеріалів, виходячи з умов експлуатації виробів з них.

Дослідження структурно-фазових особливостей отриманого пористого ХтаТСКМ дозволяють припустити можливість його використання як основи для виготовлення керамічних хімічно та термічно стійких фільтрів. Тому в подальших дослідженнях доцільним є визначення проникної здатності даного матеріалу.

Динаміку сорбційних процесів у пористому ХтаТСКМ характеризує крива водопоглинання (рис. 3).

За результатами експериментальних даних проведено розрахунок коефіцієнтів проникної здатності кераміки, який показав, що швидкість дифузії води (D_{H_2O}) в товщу зразка скла-

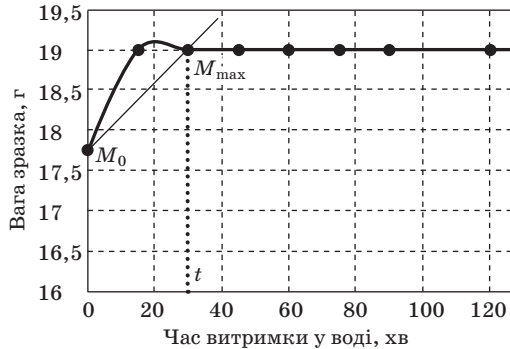


Рис. 3. Крива поглинання води керамічним зразком

дає $1,88 \cdot 10^{-5}$ см²/с, коефіцієнт сорбції води дорівнює 2,87, а кількість поглинутої води за 30 хв до повного насичення зразка склала 0,63 г. Дані розрахунки дозволили визначити загальну пористість зразка, яка відповідно дорівнює 69 %. З урахуванням наведених даних визначено коефіцієнт проникності матеріалу водою $P = 5,39 \cdot 10^{-5}$ см²/с, що свідчить про можливість використання розробленого поруватого ХтаТСКМ як основи для виготовлення керамічних фільтрів для фільтрації рідин.

В рамках дослідження можливості використання розроблених пористих ХтаТСКМ як керамічних фільтрів для очищення стічних вод машинобудівних підприємств, досліджено швидкість дифузії крізь товщу керамічного матеріалу йонів з великим та малим радіусом: $Cr_2O_7^{2-}$ — 1,1 нм та MnO_4^- — 0,614 нм, вміст яких в поверхневих водах жорстко регламентований (0,0015 мг/дм³ та 0,1 мг/дм³ відповідно) [16]. Визначено коефіцієнти дифузії вказаних іонів: $D_{Cr_2O_7^{2-}} = 6,38 \cdot 10^{-6}$ см²/с; $D_{MnO_4^-} = 1,06 \cdot 10^{-5}$ см²/с. Зважаючи на те, що розроблений пористий ХтаТСКМ характеризується коефіцієнтом дифузії води $D_{H_2O} = 1,88 \cdot 10^{-5}$ см²/с,

отримані дані свідчать про здатність затримувати іони з радіусом ~ 1 нм і більше. Це свідчить про можливість використання розроблених пористих ХтаТСКМ муліт-тіалітового складу як фільтрів очищення стічних вод промислових підприємств. Перевагою таких фільтрів є можливість багаторазової регенерації шляхом промивання розчинами кислот та лугів, а також високотемпературної термообробки.

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблено маси для виготовлення тіалітвмісної та муліт-тіалітвмісної кераміки, що забезпечують комплекс високих експлуатаційних властивостей виробів з них: міцність при стисненні $\sigma_{ст} = 100 \div 115$ Н/мм², лугостійкість 99,98—99,99 %, кислотостійкість 99,4—99,99 %, термостійкість 8—10 теплоступів (при охолодженні від 350 до 20 °С у воді). Визначено механізм фазоутворення розроблених матеріалів та встановлено, що високі показники їх хімічної і термічної стійкості обумовлені утворенням за температури 1250 °С фаз муліту, тіаліту та твердого розчину $Mg_{0,3}Al_{1,4}Ti_{1,5}O_5$ в присутності Fe_2O_3 . Підтверджено доцільність використання техногенної сировини, що утворюється при видобуванні кварцитів та у феротитановому виробництві, для інтенсифікації формування тіалітової та мулітової фаз за зниженої температури випалу виробів. Застосування відходів замість якісних глин та високовартісних технічних продуктів (глинозему, діоксиду титану) сприятиме зниженню собівартості виробів та покращенню екологічного стану промислових регіонів країни. Переваги розроблених матеріалів полягають у високій стійкості до дії реагентів кислого та лужного характеру та термічних ударів, завдяки чому область їх використання може бути значно розширена. Зокрема матеріали, що характеризуються максимальним рівнем спікання, придатні для виготовлення деталей насосів для перекачування агресивних рідин, термокислототривкої плитки та насадок для тепло- і масообмінної апаратури. Пористі ХтаТСКМ можуть бути використані як керамічні фільтри для очищення стічних вод підприємств машинобудівної та інших галузей промисловості.

Бібліографічний список

1. Черняк Л. П. Развитие производства химически стойкой керамики. *Строительные материалы и изделия*. 2004. № 4. С. 13—16.
2. Волочко А. Т., Подболотов К. Б., Дятлова Е. М. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы : монография. Минск : Беларус. навука, 2013. 385 с.

3. Krasnyi B. L., Tarasovskii V. P., Rakhmanova E. V., Bondar V. V. Chemical Resistance of Ceramic Materials in Acids and Alkalis. *Glass and Ceramics*. 2004. Vol. 61. Iss. 9—10. P. 337—339.

4. Абрахимова Е. С., Абрахимов В. З. Физико-химические процессы при обжиге кислотоупоров. СПб. : Недра, 2003. 284 с.

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

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

7. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П., Семенов С. С. Керамика для машиностроения. М. : Научтехлитиздат, 2003. 384 с.

8. Масленникова Г. Н., Харитонов Ф. Я., Дубов И. В. Расчеты в технологии керамики. М. : Стройиздат, 1984. 200 с.

9. Миронов И.М. Химически устойчивые конструкционные керамические материалы и основы технологии их производства : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.17.11. Ленинград, 1979. 39 с.

10. Сахненко Н. Д., Ведр М. В. Мониторинг и прогнозирование защитных свойств органических покрытий : монография. Х. : Новое слово, 2012. 288 с.

11. Рыщенко М. И., Федоренко Е. Ю., Лисюткина М. Ю. Термодинамические расчеты взаимодействия кристаллических фаз керамических материалов с агрессивными средами. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Хімія, хімічна технологія та екологія»*. 2014. № 52. С. 98—104.

12. Рыщенко М. И., Питак Я. Н., Федоренко Е. Ю., Лисюткина М. Ю., Бурик О. А. Стрoение системы $MgO-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2$ и ее значение для производства термически и химически стойкой керамики. *Вопросы химии и хим. технологии*. 2015. Т. 3 (101). С. 73—79.

13. Лисюткина М. Ю. Оптимизация составов масс титановой керамики низкотемпературного синтеза. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Хімія, хімічна технологія та екологія»*. 2016. № 22 (1194). С. 122—125.

14. Naghizadeh R., Rezaie H. R., Golestani-fard F. The influence of composition, cooling rate and atmosphere on the synthesis and thermal stability of aluminum titanate. *Materials Science and Engineering B*, 2009. Vol. 157. No. 1—3. P. 20—25.

15. Kang H., Du S., Doh J., Yoon J. Simultaneously rapid synthesis and consolidation of nanostructure $Mg_{0.3}Al_{1.4}Ti_{1.5}O_5$ by High Frequency Induction Heating. *Materials Letters*. 2014. Vol. 10. № 3. P. 529—533.

16. Астрелін І., Герасимов Є., Гироль А., Гироль М., Єщенко Л., Жекеєв М., Косогіна І. Фізико-хімічні методи очищення води. Керування водними ресурсами : підручник / за ред. І. М. Астреліна та Х. Ратнавіри. К. : Проект «Water Harmony», 2015. 578 с.

References (transliterated):

1. Chernyak L. P. Rozvytok vyrobnytstva khimichno stiykoyi keramiky [The development of production chemically resistant ceramics]. *Stroytelnye materyaly y yzdelyya* [Building materials and products]. 2004, no. 4, pp. 13—16. (in Ukrainian).

2. Volochko A. T., Podbolotov K. B., Dyatlova E. M. *Ohneupornyye y tuhoplavkiye keramicheskiye materyaly* [Refractory ceramic materials]. Minsk, Belarus. Navuka Publ., 2013. 385 p. (in Russian).

3. Krasnyi B. L., Tarasovskii V. P., Rakhmanova E. V., Bondar V. V. Chemical Resistance of Ceramic Materials in Acids and Alkalis. *Glass and Ceramics*. 2004, Vol. 61, Iss. 9—10, pp. 337—339.

4. Abrahamova E. S., Abrahamov V. Z. *Fiziko-khimicheskiye protsessy pri obzhige kislotouporov* [Physico-chemical processes during the firing of acid-proofs]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2003. 284 p. (in Russian).

5. Yemchenko I. V. *Osoblyvosti pokrashchennya vlastyvostey keramichnykh vyrobiv shlyakhom intensyfikatsiyi yikh spikannya: monohrafiya* [Improvement features of the ceramics products with intensification of their sintering: monograph]. Lviv, Lviv Commercial Academy Publ., 2006. 244 p. (in Ukrainian).

6. Agrafiotis C., Tsoutsos T. D. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering*. 2001, no. 21 (12), pp. 1231—1249.

7. Garshin A. P., Gropanyan V. M., Zaitsev G. P., Semenov S. S. *Keramika dlya mashinostroyeniya* [Ceramics for mechanical engineering]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2003. 384 p. (in Russian).

8. Maslennikova G. N., Kharitonov F. Ya., Dubov I. V. *Raschety v tekhnologii keramiki* [Calculations in ceramics technologists]. Moscow, Stroizdat Publ., 1984. 200 p. (in Russian).

9. Mironov I. M. *Khimicheski ustoychivyye konstruktсионnye keramicheskiye materialy i osnovy tekhnologii ikh proizvodstva: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk 05.17.11* [Chemically resistant structural ceramic materials and the basis of the technology of their production. Abstract of a thesis Dr. eng. sci. diss. 05.17.11]. Leningrad. 1979, 39 p. (in Russian).

10. Sakhnenko N. D., Ved M. V. *Monitoring i prognozirovaniye zashchitnykh svoystv organicheskikh pokrytiy: monografiya* [Monitoring and forecasting the protective properties of organic coatings: a monograph]. Khar'kov, Novoye slovo Publ., 2012. 288 p. (in Russian).

11. Ryschenko M. I., Fedorenko E. Yu., Lisyutkina M. Yu. *Termodinamicheskiye raschety vzaimodeystviya kristallicheskikh faz keramicheskikh materialov s agressivnymi sredami* [Thermodynamic calculations of the interaction of the crystalline phases of ceramic materials with aggressive media]. *Visnik NTU "KhPI". Seriya "Khimiya, khimichna tekhnologiya ta yekologiya"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Seria "Chemistry, Chemistry of Technology and Ecology"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 52, pp. 98—104. (in Russian).

12. Ryschenko M. I., Pitak Ya. N., Fedorenko E. Yu., Lisyutkina M. Yu., Burik O. A. *Stroyeniye sistemy MgO—Al₂O₃—TiO₂—SiO₂ i yeye znacheniye dlya proizvodstva termicheski i khimicheski stoykoy keramiki* [The structure of the system MgO—Al₂O₃—TiO₂—SiO₂ and its significance for the production of thermally and chemically resistant ceramics]. *Voprosy khimii i khim. tekhnologii* [Questions of chemistry and chemical technology]. 2015, Vol. 3 (101), pp. 73—79. (in Russian).

13. Lisyutkina M. Yu. *Optimizatsiya sostavov mass tialitovoy keramiki nizkotemperaturnogo sinteza* [Optimization of mass compositions of thialitic ceramics of low-temperature synthesis]. *Visnik NTU "KhPI". Seriya "Khimiya, khimichna tekhnologiya ta yekologiya"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Seria "Chemistry, Chemistry of Technology and Ecology"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 22 (1194), pp. 122—125. (in Russian).

14. Naghizadeh R., Rezaie H. R., Golestani-fard F. *The influence of composition, cooling rate and atmosphere on the synthesis and thermal stability of aluminum titanat.* *Materials Science and Engineering B*. 2009, Vol. 157, no. 1—3, pp. 20—25.

15. Kang H., Du S., Doh J., Yoon J. *Simultaneously rapid synthesis and consolidation of nanostructure Mg_{0.3}Al_{1.4}Ti_{1.5}O₅ by High Frequency Induction Heating.* *Materials Letters*. 2014, Vol. 10, no. 3, pp. 529—533.

16. Astralin I., Gerasimov E., Girol A., Girol M., Ashchenko L., Zhekeev M., Kosogina I. *Fyzyko-khymychny metody ochyshchennya vody. Keruvannya vodnymy resursamy: pidruchnyk* [Physico-chemical methods of purification. Water resources management: textbook]. Kiev, Project "Water Harmony" Publ., 2015. 578 p. (in Ukrainian).

Рецензент канд. техн. наук Куценко К. І.