

УДК 666.72

*Л.П. Щукіна^а, Я.О. Галушка^а, А.С. Савенков^а, О.О. Хлопицький^б***ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛОМАТЕРІАЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ
КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОЇ КЕРАМІКИ**^а Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна^б ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

В роботі методом кінцевих елементів досліджений напружено-деформаційний стан 3D моделей структур з різними типами пор, що імітують поризовану конструкційно-теплоізоляційну стінову кераміку. Встановлено, що на відміну від структур з еліпсоїдними і глобулярними порами структура зі сферичними порами є найбільш міцною. Досліджено відходи теплогенеруючих підприємств (золосфери, золошлак і продукти його переробки) як пороутворюючі компоненти для отримання поризованої кераміки. Досліджений хімічний склад золовідходів, визначено, що вони є алюмосилікатними залізовмісними матеріалами, які класифікуються як низькокальцієві, низькосульфатні, надкислі відходи з температурами ліквідусу в межах 1150–1700°C, що змінюються залежно від співвідношення $Al_2O_3:Fe_2O_3:SiO_2$. На основі легкотопкого суглинку і золовідходів (10–30%) за температури випалу 970°C одержані пористі керамічні матеріали, для яких вивчено їх макроструктурні показники і властивості. Показано, що для одержання теплоефективної кераміки перспективним є використання золосфер, що надають матеріалам високу пористість (загальна 54,2%, закрита 31%) при недостатньому рівні механічної міцності. Така міцність зумовлена слабкою взаємодією тугоплавкої золосфери, яка містить кварц і муліт, із суглинком в процесі випалу, що перешкоджає утворенню міцного контакту між сферою і керамічною матрицею. Золошлак та продукти його перероблення можуть бути утилізовані в технології стінової кераміки, яка за теплотехнічними характеристиками (густина, теплопровідність) відноситься до малоефективної.

Ключові слова: конструкційно-теплоізоляційна стінова кераміка, 3D моделювання, пориста структура, золовідходи, золосфери, міцність, теплопровідність.

DOI: 10.32434/0321-4095-2020-130-3-215-224

Вступ

На сьогодні будівельні технології розвиваються в напрямку застосування сучасних стінових конструкцій, що дозволяють підвищити клас енергоефективності будівель. Для зведення таких конструкцій використовують різні теплоізоляційні та конструкційно-теплоізоляційні матеріали, серед яких одне з головних місць займають великоформатні керамічні камені. Перспективи використання конструкційно-теплоізоляційних керамічних матеріалів (КТКМ) в енергозберігаючому будівництві оцінюються високо завдяки таким їх позитивним якостям, як низька гігроскопічність, стабільність «геометрії» виробів, можливість використання однорядної кладки при зниженні її ваги, дотримання усіх

екологічних критеріїв якості, тощо.

При виготовленні КТКМ їх теплотехнічні характеристики (теплопровідність, густина) зазвичай забезпечуються пустопорожністю виробів, яка може сягати 60%. Менш розповсюджений інший вид таких виробів – пористо-пустопорожні КТКМ. В той же час поєднання пустотності виробу і пористості керамічної стінки дозволяє покращити теплотехнічні властивості та забезпечити більш ефективний термічний опір стінових конструкцій.

Для виготовлення поризованої стінової кераміки використовуються різні пороутворюючі добавки, серед яких з точки зору спрямованого регулювання пористої структури інтерес становлять такі, що мають власну пористість (цеоліти,

перліт, полістирол, відходи піноскла) [1–3]. Серед таких поризаторів важливе місце займають золівідходи теплогенеруючих підприємств, утворення яких в Україні становить близько 30 млн т на рік, що становить вагомий фактор забруднення довкілля [4]. В технології стінової кераміки золівідходи використовуються як опіснювачі, частковий замітник основної сировини, паливна добавка і зазвичай розглядаються з позицій їх максимально можливої утилізації [5,6]. Питанням застосування золівідходів як пороутворюючих компонентів мас, їх впливу на пористу структуру і властивості керамічних матеріалів уваги не приділялося, хоча вони можуть розглядатися як цінний сировинний ресурс в технології КТКМ.

Метою даного дослідження була технологічна оцінка різних видів золівідходів теплогенеруючих підприємств як пороутворюючих добавок для виробництва конструкційно-теплоізоляційних керамічних матеріалів.

Теоретична частина

На першому етапі була проведена теоретична оцінка впливу типу пористої структури на механічні властивості КТКМ. За допомогою пакету SolidWorks Simulation було спроектовано три типи пористих структур у вигляді 3D моделей (рис. 1). Ці структури містять два елементи – керамічний матеріал і повітря (або іншу суміш газів) та імітують поризовану кераміку, яку можна отримати з використанням найбільш поширених поризаторів.

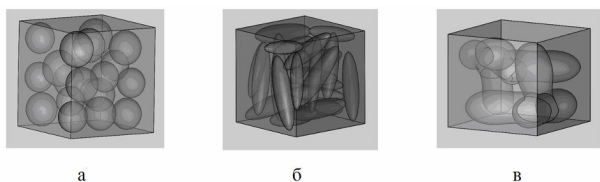


Рис. 1. Моделі пористих керамічних структур: а – модель зі сферичними порами; б – модель з еліпсоїдними порами; в – модель з порами глобулярного типу

При проектуванні були встановлені такі параметри моделей: загальна пористість – 40%, що відповідає помірно пористій структурі, хаотичне розташування пор, приблизно однаковий розмір пор. Навантаження при моделюванні змінювалося від 10 МПа до 12,5 МПа і було однаковим для всіх моделей.

При розрахунках в пакеті SolidWorks Simulation як критерій руйнування матеріалів використовувався критерій Писаренка-Лебедева, який є коректним для оцінювання міцності

крихких структурно неоднорідних матеріалів, таких як кераміка [7,8]. Даний критерій характеризує зусилля, віднесене до об'єму зразка, та являє собою критичне навантаження, яке викликає руйнування структури. Пориста керамічна структура буде руйнуватися за рахунок виникнення макро- і мікротріщин у своєму об'ємі при досягненні критичної міцності. За критичну міцність було прийнято напругу, що відповідала виходу тріщин на поверхню матеріалу, при перевищенні критичної міцності відбуватиметься його крихке руйнування. Виходячи з умов експлуатації КТКМ, було прийнято що критична міцність матеріалу становитиме 10 МПа.

На рис. 2 наведені епюри розподілу напруг в моделях з різними пористими структурами, де червоним кольором виділені структурні зони, в яких напруги перевищили критичну міцність. Епюри розподілу напруг показують, що руйнування відбуватиметься по стінках пор, які є концентратором напруг за будь-якої їх форми. Праворуч від моделей показаний об'єм їх структу-

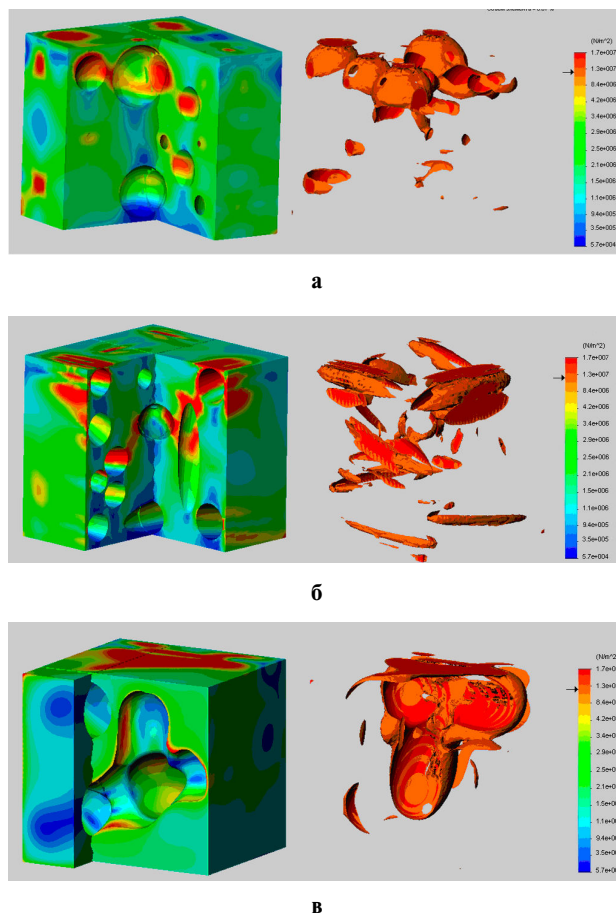


Рис. 2. 3D моделі керамічних структур в напружено-деформаційному стані під дією навантаження 10 МПа: а – сферичні пори; б – еліпсоїдні пори; в) глобулярні пори

ри, який буде зруйновано при перевищенні критичної міцності. Кількісно такий об'єм при різних навантаженнях на моделі наведено в табл. 1.

Як можна побачити з табл. 1, в усіх випадках при збільшенні навантаження від 10 МПа до 12,5 МПа пористі структури суттєво втрачають свою міцність (майже в 4 рази). Мінімальний об'єм елементів структури, в яких напруги перевищили критичну міцність, характерний для моделі зі сферичними порами. Менш міцними виявилися структури з еліпсоїдними і глобулярними порами. Це приводить до висновку, що при схожих геометричних розмірах пор та однаковому рівні пористості оптимальною структурою конструкційно-теплоізоляційної кераміки є структура зі сферичними порами. Саме такий тип структури був закладений в основу при розробці складів мас для отримання конструкційно-теплоізоляційної будівельної кераміки, який можна реалізувати з використанням золоматері-

алів.

Експериментальна частина

У дослідженні як пороутворюючі добавки були обрані різні види золівідходів, частки яких зазвичай мають сферичну форму [9] і мікропори. Всього було досліджено шість видів золоматеріалів, для яких у вихідному стані визначені гранулометричний і хімічний склад (табл. 2, табл. 3).

Проба ВК являє собою зольні мікросфери (товарний продукт компанії «Веско»), проба ЗШ – золошлак від згоряння вугілля на ТЕС, проби С1–С4 – це продукти розділення золошлаку на різні фракції (С1 – недовипал (вторинне вугілля), С2 – магнітна фракція, С3 – мікросфери, С4 – немагнітна фракція).

Гранулометричний склад золоматеріалів визначали методом сухого ситового аналізу, хімічний склад – методом хімічного аналізу згідно з ДСТУ 3305.3-9-96 та ДСТУ 3305.11-12-96.

Таблиця 1

Характеристика 3D моделей пористих керамічних структур

Вид пор	Діаметр пор, мм	Об'єм елементів структури (%), в яких напруги перевищили критичну міцність, при навантаженні	
		10 МПа	12,5 МПа
Сферичні	d=0,07–0,1	6,01	24,53
Еліпсоїдні	d1=0,07–0,1 d2=0,28–0,4	7,64	27,60
Глобулярні	d=0,07–0,1 d2=0,28–0,4	7,49	27,16

Таблиця 2

Гранулометричний склад золівідходів

Фракція	Проба ВК	Проба С1	Проба С2	Проба С3	Проба С4	Проба ЗШ
Більше 0,5 мм, %	1,3	27,3	2,5	14,7	1,4	31,4
0,15–0,5 мм, %	46,0	12,8	1,8	85,2	1,2	43,4
0,056–0,15 мм, %	50,2	31,2	59,6	0,1	77,6	21,8
Менше 0,056 мм, %	2,5	28,7	36,1	0,0	19,8	3,4

Таблиця 3

Хімічний склад золівідходів

Компоненти	Проба ВК	Проба С1	Проба С2	Проба С3	Проба С4	Проба ЗШ
SiO ₂	58,28	22,40	36,28	49,79	57,75	42,60
Al ₂ O ₃	23,19	10,36	16,94	20,61	25,16	17,40
Fe ₂ O ₃	4,20	13,36	43,30	19,40	13,52	29,40
MgO	0,93	2,45	–	3,05	–	2,60
CaO	0,58	2,42	2,76	2,55	2,51	3,20
TiO ₂	0,77	0,17	0,20	0,21	0,18	0,35
MnO	0,02	0,21	0,27	0,16	0,13	0,20
K ₂ O+Na ₂ O	3,80	–	–	–	–	–
S	–	1,37	0,25	0,12	0,75	0,27
В.п.п	9,39	47,26	–	4,08	–	3,98

Як глинистий компонент сировинних композицій було використано типовий для стінової кераміки пилуватий суглинок з числом пластичності 15,4, що відноситься до середньоспікливої глинистої сировини з температурою спікання 1090°C (табл. 4).

Підготовка суглинку до дослідження проводилась шляхом його попереднього висушування з подальшим подрібненням до проходження крізь сито № 1. Золи пропускали крізь сито № 05, їх вміст у складі шихт становив 10, 20, 30 мас.%. Формування зразків здійснювалось пластичним способом при вологості маси 20% в металевій формі у вигляді кубів розміром 25×25 мм. Зразки висушували і піддавали випалу в лабораторній муфельній печі за температурою 970°C з ізотермічним витриманням протягом однієї години.

Властивості суглинку, продуктів випалу суглинку і шихт визначали за наступними методиками. Пластичність суглинку визначали згідно з ГОСТ 21216.1-93, спікливість – за водопоглинанням і середньою густиною продуктів випалу за різних температур (ДСТУ Б В.2.7-42-97). Межа міцності при стиску керамічних зразків визначалася за ГОСТ 8462-85.

Відкрита пористість розраховувалася як добуток середньої густини і водопоглинання матеріалу, закрита пористість – як різниця між загальною та відкритою пористістю. Загальну пористість встановлювали за величиною дійсної густини матеріалів, яка визначалася пікнометричним методом згідно з ДСТУ Б В.2.7-42-97.

Для визначення теплопроводності керамічних зразків використовували розрахункову методику, згідно з якою для керамічних цегли і каменів теплопровідність може бути розрахована за емпіричною формулою

$$\lambda = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22(\rho_m/\rho_v)^2 - 0,16},$$

де ρ_m – середня густина матеріалу, кг/м³; ρ_v – густина води (1000 кг/м³).

Макроструктуру керамічних зразків зі збільшенням у 20 разів вивчали за допомогою оптичного приладу Digital microscope BW-788,

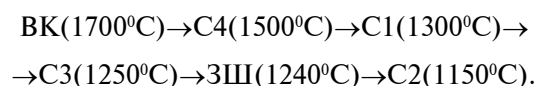
інтегрованого з персональним комп'ютером.

Фазовий склад матеріалів визначали методом рентгенофазового аналізу на рентгендіфрактометрі ДРОН-3М.

Результати та їх обговорення

Аналіз даних табл. 2 показує, що найбільш грубодисперсним є золошлак, а тонкодисперсною – проба С2, всі інші проби за гранулометричним складом відносяться до середньодисперсних. За хімічним складом (табл. 3) усі золоматеріали відносяться до низькокальцієвих, низькосульфатних, надкислих (з модулем основності менше 0,1), що характеризує їх як придатні для виготовлення будівельної кераміки [10]. Усі золи є алюмосилікатними матеріалами з високим вмістом Fe₂O₃, за виключенням золосфер ВК. Більшість проб характеризуються втратами при прожарюванні, які свідчать про вміст в них вогорюючих речовин, зокрема вуглецю. Найбільші втрати при прожарюванні має проба С1 (вторинне вугілля).

Основу хімічних складів становить система Al₂O₃–Fe₂O₃–SiO₂ (А–F–S), до якої слід було б привести склади золоматеріалів з метою прогнозування їх плавкості, але така система з ізомерами відсутня. Враховуючи наявність у пробах органічного матеріалу, діючого як відновник, припустимо, що Fe₂O₃ може відновитися до FeO, і тоді прогноз може бути здійснений за діаграмою Al₂O₃–FeO–SiO₂ (рис. 3). З положення точок складів золоматеріалів на наведеній діаграмі можна зробити висновок, що за плавкістю проби ВК і С4 є тугоплавкими, проби С1, С3 і ЗШ – середньої плавкості і лише проба С2 – легкоплавкою. Температури ліквідусу цих проб зменшуються в ряду:



Звертає на себе увагу той факт, що усі фігуративні точки розташовуються майже на одній лінії за вмістом Al₂O₃, але їх температури ліквідусу дуже різняться. Це означає, що на цю характеристику золоматеріалів чинять вплив в більшому ступені інші базові оксиди (Fe₂O₃ і SiO₂).

Таблиця 4

Випаловальні властивості суглинку

Найменування властивостей	Показники властивостей за температур випалу, °С			
	950	1000	1050	1100
Водопоглинання, %	11,8	8,5	4,9	1,0
Межа міцності при стиску, МПа	30,0	31,0	70,5	70,0
Середня густина, кг/м ³	1982	2053	2221	2270

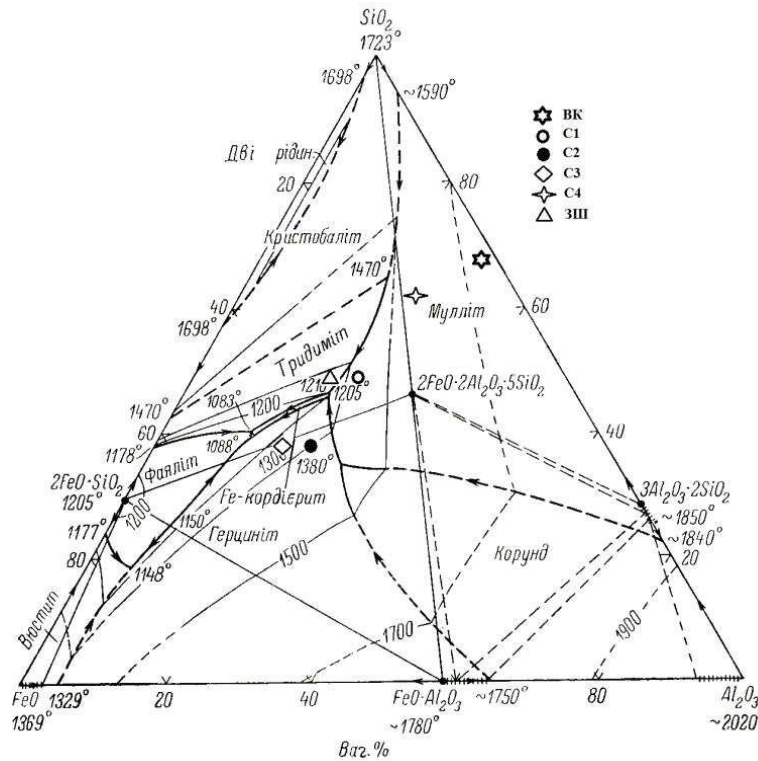


Рис. 3. Діаграма стану системи Al_2O_3 - FeO - SiO_2 з точками складів зола матеріалів

Таблиця 5

Співвідношення основних оксидів у складі золоматеріалів

Найменування проби	ВК	C1	C2	C3	C4	ЗШ
A:F:S	1:0,2:2,5	1:1,3:2,2	1:2,6:2,1	1:0,9:2,4	1:0,5:2,3	1:1,7:2,4

Можна також припустити, що означені компоненти золи будуть впливати і на процеси формування керамічних матеріалів та рівень їх властивостей. З метою оцінювання такого впливу були визначені співвідношення основних оксидів, наведені до вмісту Al_2O_3 , які наведені в табл. 5.

На рис. 4 наведена графічна інтерпретація залежності середньої густини зразків від кількості золоматеріалів в масі, звідки можна побачити, що найменший рівень цієї властивості забезпечують золосфери ВК. Так, у порівнянні з чистим суглинком (табл. 4) проба ВК знижує густину зразків на 25–50% залежно від вмісту сфер у масі. Рівень густини зразків з відходами згоряння вугілля (проби С1–С4, ЗШ) є високим (1791–2041 $кг/м^3$) незалежно від їх виду та кількості. Навіть проба С3 (виділені із золашлаку мікросфери) дозволяє знизити густину кераміки лише на 2–8% залежно від вмісту в масі (10–30 мас. %).

Значення водопоглинання, як характерис-

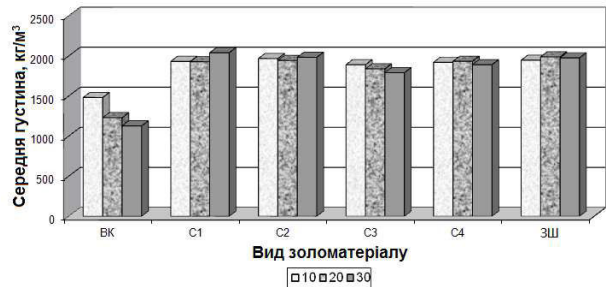


Рис. 4. Вплив виду і кількості золоматеріалів на середню густину керамічних зразків

тики спікання матеріалів (рис. 5), показують, що найбільшим воно є для зразків ВК. Це суперечить очікуваним результатам щодо зменшення відкритої пористості матеріалу при введенні закритих мікросфер. Найвірогіднішою причиною цього є більша тугоплавкість оболонки сфери порівняно з масою, а отже й гірша спікливість контактних зон «маса–зольний наповнювач». Логічно припустити, що це заважає утворенню

щільного контакту між сферою і масою і, вірогідно, створює неспечену зону, яка уявляє собою відкритий простір (пору). Для усіх інших зразків теж можна побачити зв'язок з хімічним складом золоматеріалів: менше водопоглинання мають матеріали складів С2 і ЗШ, що містять золи з найбільшою кількістю Fe_2O_3 , який умовно можна віднести до плавнів.

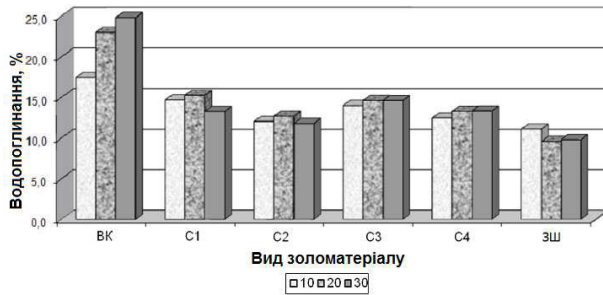


Рис. 5. Вплив виду і кількості золоматеріалів на водопоглинання керамічних зразків

Цими ж причинами можна пояснити і зміни механічних властивостей зразків (рис. 6). Матеріали складів С2 і ЗШ вигідно відрізняються від інших за значеннями межі міцності при стиску. Суттєво менший рівень міцності мають зразки з мікросферами ВК.

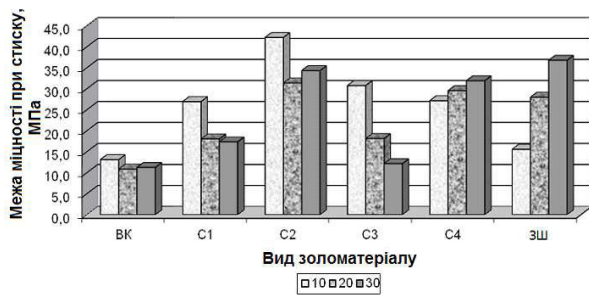


Рис. 6. Вплив виду і кількості золоматеріалів на межу міцності при стиску керамічних зразків

Враховуючи тісний кореляційний зв'язок між теплопровідністю і густиною матеріалів, закономірно, що теплопровідність виявляється меншою для зразків ВК і С3 зі сферами (рис. 7). У порівнянні зі зразком суглинку з коефіцієнтом теплопровідності 0,9 Вт/(м·К) для зразків ВК він зменшується на 26–47% і С3 – на 2–8% залежно від кількості золівідходів у масі.

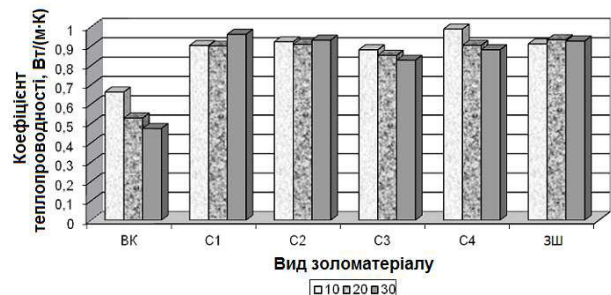


Рис. 7. Вплив виду і кількості золоматеріалів на коефіцієнт теплопровідності керамічних зразків

Для з'ясування впливу структури зразків на їх властивості розглядалися макроструктура матеріалів та показники пористості (табл. 6), які аналізувалися у порівнянні з продуктами випалу суглинку, для якого значення відкритої пористості становило 20,0%, закритої – 8,2%. Для виключення впливу фактора кількості золдобавки розглядали зразки з однаковим її вмістом (20 мас.%).

Як видно з табл. 6, макроструктура зразків залежить від дисперсності самої добавки. Так, «грубу» структуру з елементами крупних розмірів мають зразки С3 і ЗШ, що містять грубодисперсний золоматеріал, усі інші характеризуються «тонкою» внутрішньою структурою. Щодо матеріалів з мікросферами (ВК і С3), то більш дисперсна золдобавка ВК забезпечує більш рівномірну структуру керамічного матеріалу. Але в той же час, зразки ВК мають найменшу механічну міцність, що свідчить про несуттєву значимість

Таблиця 6

Характеристика структури керамічних зразків з 20% золоматеріалів

Назва проби	ВК ₂₀	С1 ₂₀	С2 ₂₀	С3 ₂₀	С4 ₂₀	ЗШ ₂₀
Макроструктура зрізу зразка (збільшення ×20)						
Пористість відкрита, %	23,2	29,3	24,3	27,0	25,5	19,1
Пористість закрита, %	31,0	3,8	4,4	2,5	1,3	6,1

фактора однородності структури в даному випадку.

Аналізуючи співвідношення відкритих і закритих пор в матеріалах, слід зазначити, що найбільшою відкритою пористістю характеризуються зразки С1, що пояснюється значним вмістом вуглецю у складі золоматеріалу (47,26%). Мінімальний і очікуваний рівень відкритої пористості мають зразки із золосферами ВК, вони ж мають і максимальну закриту пористість. Матеріал з мікросферами С3 має низький рівень закритої пористості (2,5%), що вказує на незначну частку мікросфер в самій добавці або їх плавлення за рахунок взаємодії з масою з утворенням легкотопких сполук з відповідним закриттям пор.

Важливо зазначити, що зразки із золосфе-

рами ВК не вкладаються у встановлену раніше закономірність про те, що матеріали з більшою кількістю закритих пор є міцнішими [11]. Це підтверджується найменшим серед усіх рівнем механічної міцності зразків ВК₂₀ (межа міцності при стиску 10,9 МПа) з найбільшою закритою пористістю (31,0%). Цей факт вказує на те, що процеси формування структури матеріалів із золосферами, скоріш за все, відбуваються за принципом створення композиційних матеріалів, в яких за міцність відповідають і керамічна матриця, і наповнювач. Можна припустити, що в даному випадку з позицій міцності дуже важливим фактором є міцність контактної зони між керамічною матрицею і зольним наповнювачем, яка може бути забезпечена за рахунок їх взаємодії на межі розподілу фаз. Але при викорис-

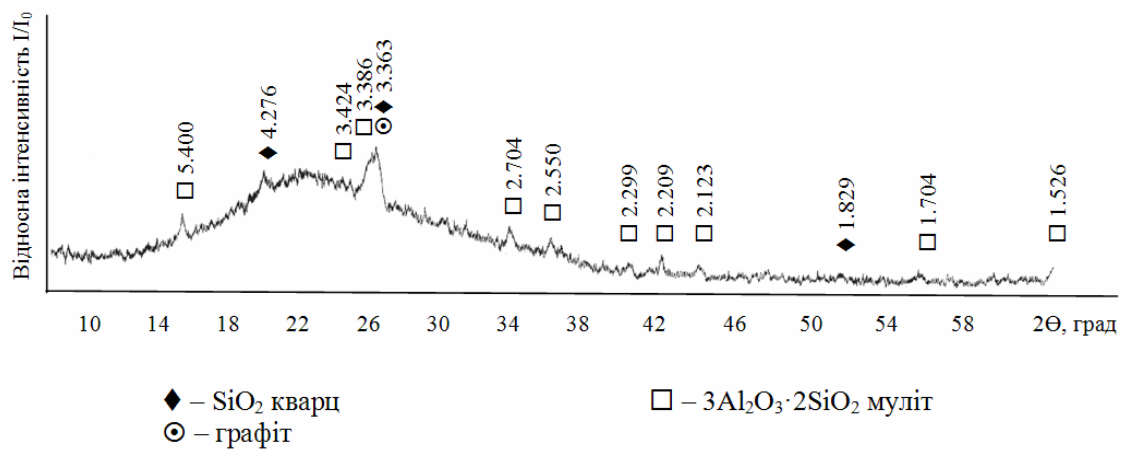


Рис. 8. Рентгенограма золосфер ВК

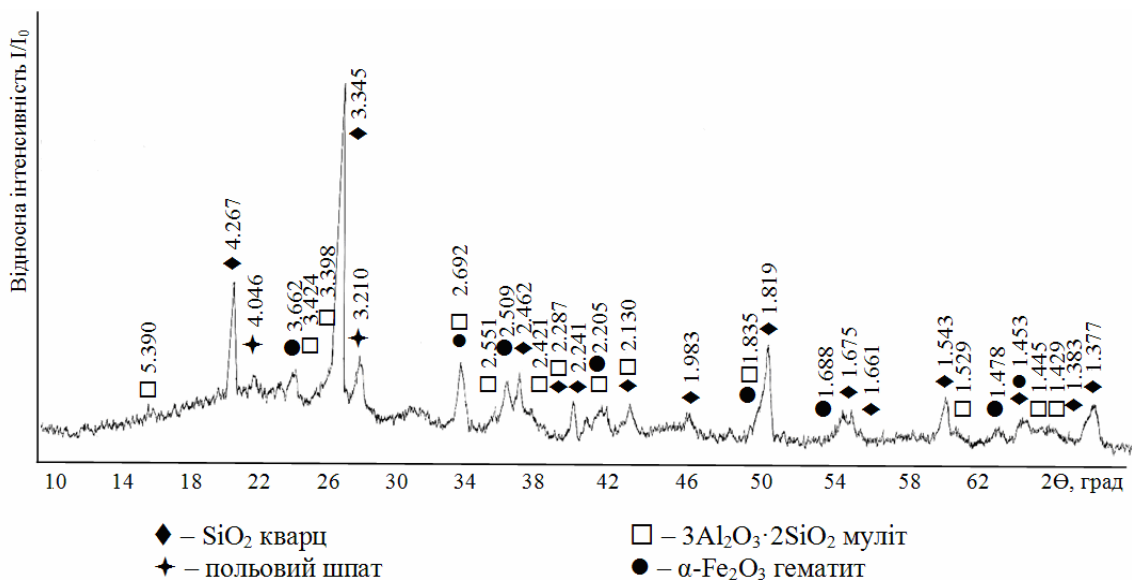


Рис. 9. Рентгенограма керамічного матеріалу з вмістом 20% мікросфер ВК

танні більш тугоплавких зол у порівнянні з керамічною матрицею (температура ліквідусу мікросфер ВК становить 1700°C при $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2=1:0,2:2,5$) утворення такої зони ускладнено.

Вказане припущення було перевірено шляхом вивчення змін фазового складу золосфер (рис. 8) і керамічного зразка з їх 20-%-вим вмістом ВК₂₀ (рис. 9).

Дані рентгенофазового аналізу вихідної проби ВК показують, що золосфери являють собою майже аморфний матеріал з незначним вмістом кварцу та муліту. Керамічний зразок з цими золосферами, отриманий за температури випалу 970°C , містить у фазовому складі: гематит, польовий шпат, кварц (реліктові фази термообробленого суглинку згідно з даними рентгенофазового аналізу продуктів його випалу), невелику кількість склофази і муліт. Присутність у зразках фази муліту мала б підвищити їх механічну міцність, але цього не відбулося. Причиною є те, що муліт не був синтезований в процесі випалу зразків, а був привнесений в матеріал мікросферами. Отже, ця фаза присутня не в керамічній матриці, а тільки в золосфері і, тим самим, зміцнює тільки золосферу. За межі міцності при стиску випаленого суглинку ≈ 30 МПа і міцній золосфері (за рахунок муліту) механічна міцність пористого матеріалу виявляється відносно низькою (10,9 МПа). Такий результат пояснюється слабкою взаємодією (або навіть її відсутністю) між золосферою та суглинком в процесі термічного оброблення за причини тугоплавкості золосфери, що не дає змоги утворитися міцному контакту між цими складовими матеріалу, створює додаткову пористість (табл. 6) і негативно впливає на показники міцності матеріалів (рис. 6). В той же час, незважаючи на недостатню механічну міцність матеріалів, тільки золосфери ВК дають змогу одержувати керамічні матеріали, які за теплотехнічними властивостями згідно з ДСТУ Б В.2.7-61:2008 відносяться до групи ефективних і можуть слугувати як конструкційно-теплоізоляційна стінова кераміка марки М100. Керамічні матеріали з усіма іншими золівідходами за цими ж ознаками класифікуються як малоефективні.

Висновки

Здійснена теоретична оцінка впливу типу пористої структури на механічні властивості конструкційно-теплоізоляційних керамічних матеріалів. З використанням методу кінцевих

елементів побудовані 3D моделі пористих керамічних структур зі сферичними, еліпсоїдними і глобулярними порами, які імітують структури поризованої кераміки з найбільш поширеними поризаторами. Проаналізований напружено-деформаційний стан моделей під дією різного навантаження і встановлено, що при однаковому рівні пористості найбільш міцною є структура зі сферичними порами.

Досліджені різні види золівідходів на предмет їх використання як пороутворюючих добавок в масах на основі легкотопкого суглинку: золосфери як товарний продукт, золошлак ТЕС та продукти його технологічної переробки. Встановлено, що за хімічним складом золівідходи є алюмосилікатними ферумовмісними матеріалами, що класифікуються як низькокальцієві, низькосульфатні, надкислі відходи, придатні для виготовлення будівельної кераміки. На основі аналізу фазових співвідношень в алюмоферосилікатній системі оксидів здійснено прогноз плавкості золівідходів. Встановлено, що температури їх ліквідусу змінюються в межах $1150\text{--}1700^{\circ}\text{C}$ і залежать від співвідношення базових оксидів Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 . Найбільш тугоплавкими є золосфери з температурою ліквідусу 1700°C , що характеризуються $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2=1:0,2:2,5$.

Для керамічних мас, що містили легкотопкий суглинок і золівідходи в кількості 10–30%, вивчено вплив золівідходів на властивості і структуру керамічних матеріалів, одержаних за температури випалу 970°C . Встановлено, що найменші показники середньої густини поризованої кераміки ($1005\text{--}1400$ кг/м³), коефіцієнта теплопроводності ($0,43\text{--}0,62$ Вт/(м·К)) можуть бути досягнуті при використанні золосфер, які надають матеріалу високий рівень пористості (загальна – 54,2%, закрыта – 31%). Недоліком кераміки із золосферами є відносно невеликий рівень межі міцності при стиску (10–11 МПа), що зумовлено слабкою взаємодією тугоплавкої золосфери із суглинком в процесі випалу.

Серед усіх досліджених золівідходів найбільш перспективними для одержання теплоефективної кераміки є золосфери, які, на відміну від інших золоматеріалів, сприяють формуванню структури з високим рівнем загальної і закрытої пористості. При використанні золосфер необхідною є розробка способів забезпечення міцного контакту на межі фаз «керамічна матриця–зольний наповнювач» для підвищення міцності матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ashmarin A.G., Vlasov A.S. Wall ceramics from zeolite-bearing argillaceous materials // *Glass Ceram.* – 2005. – Vol.62. – P.314-316.
2. Voronin K.M., Nekrasova S.A., Artamonova A.V. Development of raw-batch compositions for the production of efficient solid ceramic brick // *Glass Ceram.* – 2016. – Vol.72. – P.449-450.
3. Ivleva I.A., Panova O.A. Comprehensive evaluation of the effect of the mineralogical composition of clays and a porous glass component on the thermal conductivity and frost resistance of the heat-efficient wall ceramics // *Glass Ceram.* – 2019. – Vol.76. – P.297-301.
4. Кутувий В.О., Коновальчик М.В., Каниук Н.П. Золотидвали електростанцій як джерело забруднення довкілля // *Вісті автомобільно-дорожнього ін-ту.* – 2006. – № 1(2). – С.90-94.
5. *Properties of ceramic wall materials with different burnable components* / Pishch I.V., Biryuk V.A., Klimosh Yu.A., Popov R.Yu., Shidlovskii A.V. // *Glass Ceram.* – 2015. – Vol.72. – P.57-60.
6. Aydin T. Development of lightweight ceramic construction materials based on fly ash // *J. Aust. Ceram. Soc.* – 2017. – Vol.53. – P.109-115.
7. *Low-melting glass-ceramic bonds based on oxide compositions for diamond-abrasive tools* / Fedorenko O.Yu., Bohdanova K.B., Fedorenko D.O., Lesnych N.F., Reheda N.M. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* – 2019. – No. 3. – P.158-165.
8. Semenov A.A. Analysis of the strength of shell structures, made from modern materials, according to various strength criteria // *Diagn. Resour. Mech. Mater. Struct.* – 2018. – No. 1. – P.16-33.
9. *Розробка комплексної вигоряючої добавки для виробництва поризованої будівельної кераміки з підвищеною міцністю* / Хоменко О.С., Срібняк Н.М., Грецай С.О., Телющенко І.Ф., Івченко В.Д., Душин В.В. // *Питання хімії та хімічної технології.* – 2019. – № 3. – P.166-175.
10. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 368 с.
11. *Технологічні способи регулювання пористої структури і властивостей конструкційно-теплоізоляційних керамічних матеріалів* / Шукіна Л.П., Цовма В.В., Галушка Я.О., Міхеєнко Л.О. // *Технол. аудит і резерви виробництва.* – 2015. – № 6/4(26). – С.51-55.

Надійшла до редакції 18.03.2020

PROSPECTS OF THE APPLICATION OF COAL ASH MATERIALS TO PRODUCE CONSTRUCTION HEAT-INSULATION CERAMICS

L.P. Shchukina ^{a,*}, Ya.O. Galushka ^a, A.S. Savenkov ^a, A.A. Khlopytskyi ^b

^a National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

^b Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

* e-mail: milinvest@meta.ua

In this work, we studied the stress-strain state of 3D models of structures with different types of pores imitating porous construction heat-insulating wall ceramics by means of the finite element method. It was found that a structure with spherical pores is more durable than the structures with ellipsoidal and globular pores. The wastes of heat-generating facilities (ash sphere, ash and slag and products of its processing) were investigated as prospective pore-forming components for the production of porous ceramics. The chemical composition of the ash was studied and it was determined that they belong to aluminosilicate iron-containing materials, which are classified as low-calcium, low-sulfate and ultra-acidic wastes with liquidus temperatures lying in the range of 1150 to 1700°C, which varies depending on the ratio $Al_2O_3:Fe_2O_3:SiO_2$. Based on low-melting loam and ash waste (10–30%) at a firing temperature of 970°C, porous ceramic materials were prepared and its macrostructural characteristics and properties were studied. It was shown that the use of ash spheres is promising to obtain heat-efficient heat-insulating ceramics. Ash spheres provide materials with high porosity (total 54.2% and closed 31%) at a low level of mechanical strength. This strength is due to the weak interaction of the refractory ash sphere that contains silica and mullite with loam during the firing process, which prevents the formation of strong contact between the sphere and the ceramic matrix. Ash and slag products of its processing can be utilized in the technology of wall ceramics, which is commonly regarded as ineffective with respect to its thermal characteristics (density, thermal conductivity).

Keywords: construction heat-insulating wall ceramics; 3D modeling; porous structure; ash waste; ash spheres; strength; thermal conductivity.

REFERENCES

1. Ashmarin A.G., Vlasov A.S. Wall ceramics from zeolite-bearing argillaceous materials. *Glass and Ceramics*, 2005, vol. 62, pp. 314-316.
2. Voronin K.M., Nekrasova S.A., Artamonova A.V. Development of raw-batch compositions for the production of efficient solid ceramic brick. *Glass and Ceramics*, 2016, vol. 72, pp. 449-450.
3. Ivleva I.A., Panova O.A. Comprehensive evaluation of the effect of the mineralogical composition of clays and a porous glass component on the thermal conductivity and frost resistance of the heat-efficient wall ceramics. *Glass and Ceramics*, 2019, vol. 76, pp. 297-301.
4. Kutovy V.O., Konovalchuk M.V., Kaniuk N.P. Zolovidvaly elektrostantsii yak dzherelo zabrudnenn'ya dovkill'ya [Ash burrow as a source of environmental pollution]. *Visti Avtomobil'no-Dorozhnogo Instytutu*, 2006, no. 1(2), pp. 90-94. (in Ukrainian).

5. Pishch I.V., Biryuk V.A., Klimosh Yu.A., Popov R.Yu., Shidlovskii A.V. Properties of ceramic wall materials with different burnable components. *Glass and Ceramics*, 2015, vol. 72, pp. 57-60.

6. Aydin T. Development of lightweight ceramic construction materials based on fly ash. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2017, vol. 53, pp. 109-115.

7. Fedorenko O.Yu., Bohdanova K.B., Fedorenko D.O., Lesnych N.F., Reheda N.M. Low-melting glass-ceramic bonds based on oxide compositions for diamond-abrasive tools. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2019, no. 3, pp. 158-165.

8. Semenov A.A. Analysis of the strength of shell structures, made from modern materials, according to various strength criteria. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2018, no. 1, pp. 16-33.

9. Khomenko O.S., Sribniak N.M., Hretsai S.O., Teliushchenko I.F., Ivchenko V.D., Dushyn V.V. Rozrobka kompleksnoi vygoryayuchoyi dobavky dl'ya vyrobnytstva poryzovanoyi budivel'noyi keramiky z pidvyshchenoyu mitsnistyu [Development of a complex burnable additive for manufacture of porous building ceramics with high strength]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2019, no. 3, pp. 166-175. (in Ukrainian).

10. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., *Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials produced from industrial waste]. Feniks, Rostov-na-Donu, 2007. 368 p. (in Russian).

11. Shchukina L.P., Tsovma V.V., Galushka Ya.O., Mikheienko L.O. Tekhnologichni sposoby reguliuvann'ya porystoyi struktury i vlastyvostei konstruktsiino-teploizoliatsiinykh keramichnykh materialiv [Process methods of pore structure and properties control of heat insulation ceramic construction materials]. *Tekhnologicheskii Audit i Rezervy Proizvodstva*, 2015, no. 6/4(26), pp. 51-55. (in Ukrainian).