

UDC 666.11

INFLUENCE OF THE MICRO-WOLLASTONITE ADDITIVES ON THE CRYSTALLIZATION AND PROPERTIES OF POROUS GLASS-CRYSTALLINE MATERIALS CONTAINING DIFFERENT TYPES OF GAS-FORMING AGENTS

Yaroslava I. Lykholat (Koltsova)*, Svetlana I. Petukh

Ukrainian State Chemical-Technological University, 8, Gagarina str., Dnipro, 49000, Ukraine

Received 23 March 2022; accepted 2 October 2022; available online 31 October 2022

Abstract

In the work, studies aimed at increasing the strength of porous glass-crystalline materials due to the formation of needle-like wollastonite crystals in the inter-pore partitions, which have a reinforcing effect, were carried out. Porous materials were obtained on the basis of glass cullet with the use of raw materials of natural (loam) and man-made (open-hearth furnace slag and blast furnace slag, fly ash) as gas-forming agents. Additives of microwollastonite in the amount of 1.5–7.5 mass. h. were added to the composition of glass mixtures with gas-forming agents. Samples were burned at temperatures of 750–850 °C, depending on the type of gas-forming agent. With the help of differential thermal analysis, the processes taking place in experimental batches with the content of microwollastonite additive under heating conditions were investigated, and with the help of X-ray phase analysis, the change in the phase composition of materials after burning was investigated. For the experimental samples the volumetric weight (kg/m³), compressive strength (MPa) were determined, and the coefficient of constructive quality was calculated. As a result of the work, it was established that the addition of microwollastonite contributes to the formation of wollastonite as the main crystalline phase in the materials, regardless of the type of gas-forming agent, and increases their strength to 6.3 MPa. The coefficient of constructive quality of the samples into which microwollastonite was introduced in the amount from 1.5 to 4.5 mass. h., increases by an average of 10 %, its further introduction contributes to the reduction of the specified coefficient due to the increase in the volumetric weight of the materials and is not advisable.

Keywords: porous glass-crystalline materials; temperature-time burning mode; glass cullet; loam; ash; slag; coefficient of constructive quality.

ВПЛИВ ДОБАВОК МІКРОВОЛАСТОНІТУ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОРИСТИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВМІСТОМ РІЗНИХ ВИДІВ ГАЗОУТВОРЮВАЧІВ

Ярослава І. Лихолат (Кольцова), Світлана І. Петух

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», просп. Гагаріна, 8, Дніпро, 49000, Україна

Анотація

У роботі проведені дослідження, спрямовані на підвищення міцності пористих склокристалічних матеріалів за рахунок утворення в міжпорових перегородках голчастих кристалів волластоніту, що мають армуючий ефект. Пористі матеріали отримували на основі бою скла з використанням в якості газоутворювачів сировини природного (суглинки) та техногенного (мартенівський та доменний шлаки, зола-унесення) походження. До складу сумішей скла з газоутворювачами вводили добавки мікрОВОластоніту в кількості 1.5–7.5 мас. ч. Випал зразків здійснювали за температур 750–850 °C в залежності від виду газоутворювача. За допомогою диференційно-термічного аналізу було досліджено процеси, що відбуваються в дослідних шихтах з вмістом добавки мікрОВОластоніту в умовах нагрівання, а за допомогою рентгенофазового аналізу – зміну фазового складу матеріалів після випалу. Для дослідних зразків визначали об'ємну вагу (кг/м³), міцність на стиск (МПа) та розраховували коефіцієнт конструктивної якості. У результаті проведеної роботи встановлено, що додавання мікрОВОластоніту сприяє утворенню в матеріалах волластоніту як основної кристалічної фази незалежно від виду газоутворювача та підвищує їх міцність до 6.3 МПа. Коефіцієнт конструктивної якості зразків, до складу яких вводили мікрОВОластоніт в кількості від 1.5 до 4.5 мас. ч., збільшується в середньому на 10 %, подальше ж його введення сприяє зниженню показників зазначеного коефіцієнту за рахунок зростання об'ємної ваги матеріалів та не є доцільним.

Ключові слова: пористі склокристалічні матеріали; температурно-часовий режим випалу; склобій; суглинок; зола; шлак; коефіцієнт конструктивної якості.

*Corresponding author: e-mail address: kolyariv@ukr.net

© 2022 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v30i3.254049

Вступ

На сьогоднішній день надзвичайно актуальною залишається проблема енерго- та ресурсозбереження в умовах постійного підвищення цін на енергоносії, яка вирішується, зокрема, за рахунок використання ефективних теплоізоляційних матеріалів [1–4].

Найкраще поєднання фізико-технічних та експлуатаційних властивостей має піноскло. Воно характеризується високими теплоізоляційними, звуко- та гідроізоляційними характеристиками, хімічною та біологічною стійкістю, довговічністю [5–8].

Піноскло, отримане за рахунок спучування скляної маси, завдяки наявності рівномірно розподілених в об'ємі замкнених пор застосовують в якості теплоізоляційних блоків для будівництва. Основними стадіями його виробництва порошковим способом є підготовка шихти (змішуванні подрібненого скла з газоутворювачем), спінення отриманої суміші та відпал з метою усунення термічних напруг [9–11].

Вважається [12–14], що процес кристалізації піноскляної маси під час виготовлення піноскла – явище небажане, оскільки кристали, що утворюються в стінках пор, значно знижують загальну пластичність спіненої маси, а під час прориву стінок сприяють утворенню сполучених пор, що знижує міцність та підвищує водопоглинання готового матеріалу. Авторами [15] зазначається, що за умови застосування в якості сировини склобою за повторного високотемпературного нагрівання можлива кристалізація скла, яка перешкоджає спученню та призводить до утворення перфорованих пор. У роботі [16] після встановлення схильності порошкоподібного скла за повторного нагрівання до утворення таких кристалічних фаз як кристобаліт, кварц, діопсид та девітрит було досліджено та запропоновано добавки (бура, V_2O_5 та їх комбінації з Al_2O_3), які сприяють значному пригніченню процесу кристалізації.

Проте результати досліджень останніх років вказують на можливість отримання пористих склокристалічних матеріалів (ПСКМ) з низькими показниками щільності та водопоглинання і певним вмістом кристалічних фаз, що сприяє підвищенню їх механічної міцності в порівнянні зі звичайним піносклом.

Аналіз науково-технічної літератури [17–22] показав можливість отримання ПСКМ з використанням такої сировини як опока, шлаки ТЕС та природні алюмосилікати. Але їх застосування передбачає або високотемпературний синтез піноскла (близько 900–950 °C), або попередню стадію варки склогранулята з подальшим його спучуванням. Японськими дослідниками [23] також розроблений спосіб отримання закристалізованого піноскла з середньою щільністю 400–1000 кг/м³ та міцністю на стиск 2.5–3.0 МПа. Недоліком запропонованого складу піноскла є високі температури варіння (до 1450 °C) і вартість літійвмісних стекол.

У зв'язку з вищевикладеним, на нашу думку є надзвичайно важливим дослідження можливості отримання пористого матеріалу з частково закристалізованою структурою міжпорових перегородок з використанням недефіцитної природної та вторинної сировини.

У попередніх роботах [24; 25] на основі склобою були отримані пористі склокристалічні матеріали з вмістом в міжпорових перегородках до 13 % кристалічної фази, що підвищувало їх міцність до 5.16 МПа. В якості газоутворювачів було запропоновано використання суглинків та металургійних шлаків без додаткового введення інших газоутворюючих добавок. Фізико-хімічні дослідження запропонованих газоутворювачів показали наявність у їх складі сполук (гідросилікатів кальцію та магнію, каолініту, карбонату кальцію, вуглецю тощо), здатних до утворення газової фази у широкому температурному інтервалі (510–900 °C). До того ж обрані добавки одночасно відігравали роль як компоненту, що утворює достатню кількість газової фази для спучення скломаси у піропластичному стані, так і наповнювача, який сприяє стабілізації пористої структури матеріалу в процесі випалу. В подальшому було встановлено, що введення добавок мікроволастоніту (МКВ) в кількості до 4.5 мас. ч. в матеріали, що містили в якості газоутворювача мартенівський шлак, надавало армуючого ефекту та сприяло підвищенню коефіцієнту конструктивної якості ПСКМ до $16.33 \cdot 10^{-3}$. Проте вплив такої добавки на властивості ПСКМ з іншими запропонованими нами газоутворювачами

природного та техногенного походження не було досліджено.

Метою даної роботи було встановлення впливу добавки мікроластоніту на фазовий склад та властивості ПСКМ з використанням в якості газоутворювачів суглинку, металургійних шлаків та золи-унесення теплоелектростанцій.

Експериментальна частина

Для отримання ПСКМ використовували бій листового скла, а в якості газоутворюючих добавок – суглинок Сурсько-Покровського родовища Дніпропетровської області, мартенівський шлак ПАТ «Інтерпайп НТЗ», доменний шлак ПАТ «Євраз ДМК ім. Петровського», золу-унесення Придніпровської ТЕС Дніпропетровської області та мікроластоніт марки МВ-03-97 виробництва ЗАО «Геоком» зі

співвідношенням довжини до діаметру 5:1. Склади дослідних сумішей наведено в табл. 1.

Шихти, які містили бій скла та газоутворюючу добавку, готували сухим помелом сировинних матеріалів у кульовому фарфоровому млині. З сировинних сумішей з питомою поверхнею 300 м²/кг та вологістю 10 % методом напівсухого пресування формували зразки циліндричної форми з діаметром 40 мм та висотою 26 мм. Після сушіння їх випалювали в лабораторній електропечі за температурно-часовими режимами [26], які передбачають завантаження в попередньо розігріту до 600 °С піч, швидкий підйом до максимальної температури випалу (750–850 °С в залежності від типу газоутворювача), витримку за цієї температури та поступове охолодження зразків разом з піччю.

Table 1

Compositions of experimental mixtures

Таблиця 1

Склади дослідних сумішей

№ складу	Вид газоутворювача	Вміст компонентів, мас.%		Вміст мікроластоніту, мас.ч.*
		Бій скла	Газоутворювач	
1	-	100	-	-
2				3
3				-
4				1.5
5	Зола-унесення	85	15	3.0
6				4.5
7				6.0
8				7.5
9				-
10				1.5
11	Доменний шлак	90	10	3.0
12				4.5
13				6.0
14				7.5
15				-
16				1.5
17	Мартенівський шлак	90	10	3.0
18				4.5
19				6.0
20				7.5
21				-
22				1.5
23	Суглинок	85	15	3.0
24				4.5
25				6.0
26				7.5

* Добавку мікроластоніту вводили понад 100 мас.%

Питому поверхню сировинних сумішей визначали на приладі Товарова, суть якого заснована на вимірюванні опору, який

чинить шар ущільненого матеріалу повітрю, що просмоктується.

Для дослідних зразків визначали об'ємну вагу (кг/м³), міцність на стиск (МПа) та

розраховували коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ), як відношення межі міцності на стиск (σ , МПа) до об'ємної ваги (ρ , кг/м³).

Диференційно-термічний аналіз дослідних сумішей проводили на дериватографі Q1500-D системи Paulik, Paulik, Erdei. Рентгенофазовий аналіз одержаних композиційних матеріалів виконували за допомогою рентгенівської установки ДРОН-3 в Cu-K α випромінюванні. Кількість кристалічної фази у складі композиційного матеріалу визначали за ДСТУ БВ 2.7-264:2011. Метод базується на визначенні співвідношення між вихідною кількістю матеріалу та залишком після взаємодії із

розчинами сульфатної та гідрогенфлуоридної кислот.

Результати та їх обговорення

Для дослідження впливу добавки мікроластоніту (МКВ) на процеси, що відбуваються за нагрівання порошкоподібного скла нами спочатку був проведений диференційно-термічний аналіз суміші, що вміщувала бій скла та 3 мас. ч МКВ (рис. 1). Як видно з рис. 1, додавання мікроластоніту у склбій сприяє зменшенню температури початку розм'якшення скла. Подібний ефект був відмічений в процесі дослідження практично всіх дослідних сумішей бою скла з різними газотворювачами та 3 мас. ч. МКВ.

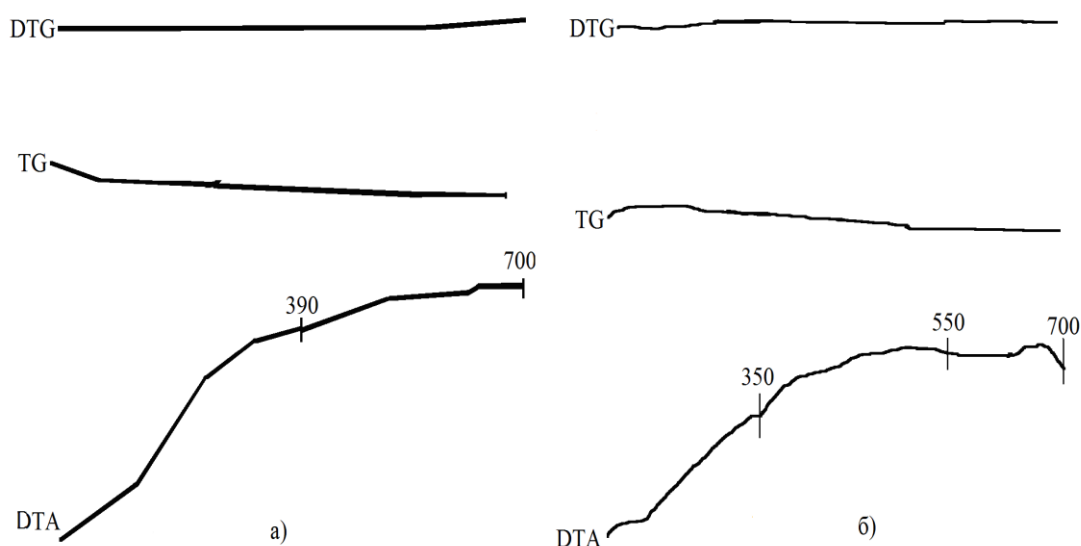


Рис. 1. Комплексний термогравіметричний аналіз дослідних проб з вмістом бою скла (а) та бою скла і 3 мас. ч. МКВ (б)

Fig. 1. Comprehensive thermogravimetric analysis of experimental samples with the content of glass cullet (a) and glass cullet and 3 mass. h. of MCV (b)

Для дослідження фазового складу дослідних матеріалів нами був проведений рентгенофазовий аналіз випалених зразків

без вмісту МКВ та із вмістом 3 мас. ч. МКВ. Рентгенограми дослідних матеріалів представлені на рис. 2-5.

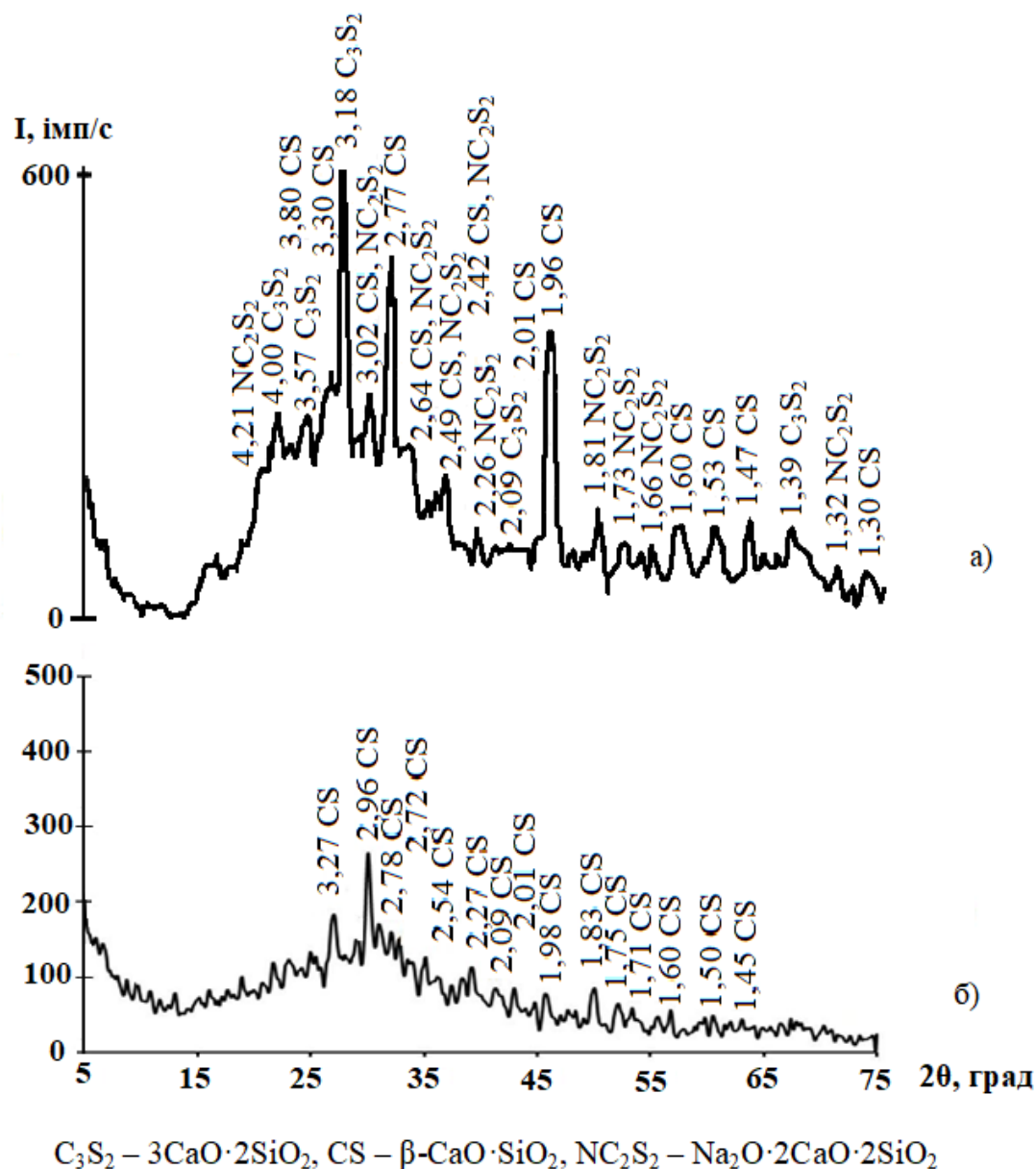


Рис. 2. Рентгенограма дослідних зразків із вмістом: а) 10 мас. % доменного шлаку, б) 10 мас. % доменного шлаку з добавкою 3 мас. ч. МКВ

Fig. 2. X-ray pattern of experimental samples containing: a) 10 wt. % blast furnace slag, b) 10 wt. % blast furnace slag with an additive of 3 mass. h. MCV

З рис. 2а видно, що кристалічна фаза зразка з вмістом 10 мас. % доменного шлаку представлена ранкінітом, двокальцієвим дисилікатом натрію та волостонітом. За

додавання ж 3 мас. ч. мікрОВОЛОСТОНІТУ спостерігається утворення волостоніту, як основної кристалічної фази (рис. 2б).

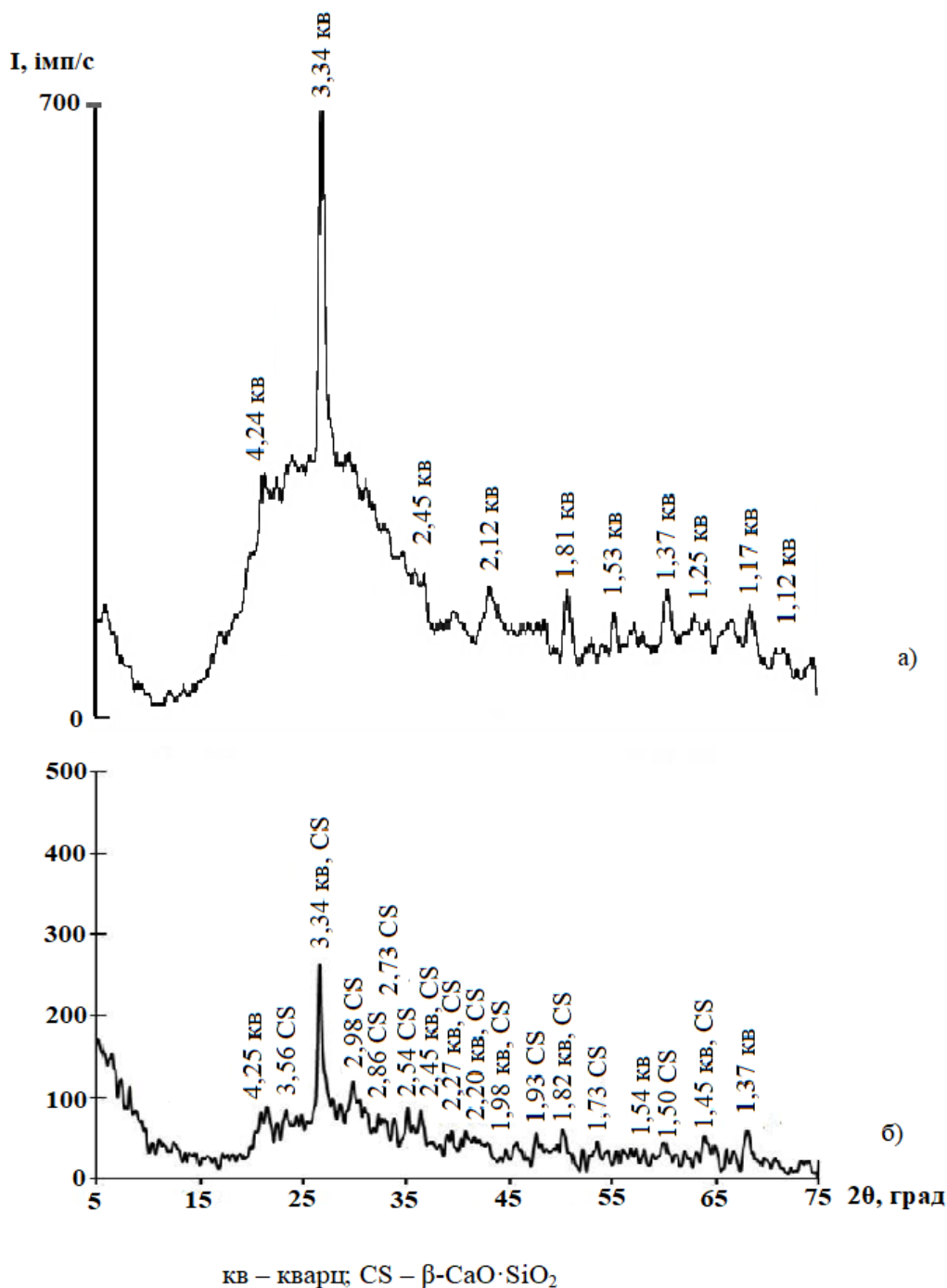


Рис. 3. Рентгенограма дослідних зразків із вмістом: а) 15 мас. % суглинку, б) 15 мас. % суглинку з добавкою 3 мас. ч. МКВ

Fig. 3. X-ray pattern of experimental samples containing: a) 15 wt. % loam, b) 15 wt. % loam with an additive of 3 mass. h. MCV

Аналогічний перерозподіл кристалічних фаз спостерігається при введенні мікроволастоніту в матеріали з іншими газоутворювачами. Так, за вмісту в якості

газоутворювача суглинку основною кристалічною фазою є кварц (рис. 3а), а після введення мікроволастоніту: кварц та воластоніт (CS) (рис. 3б).

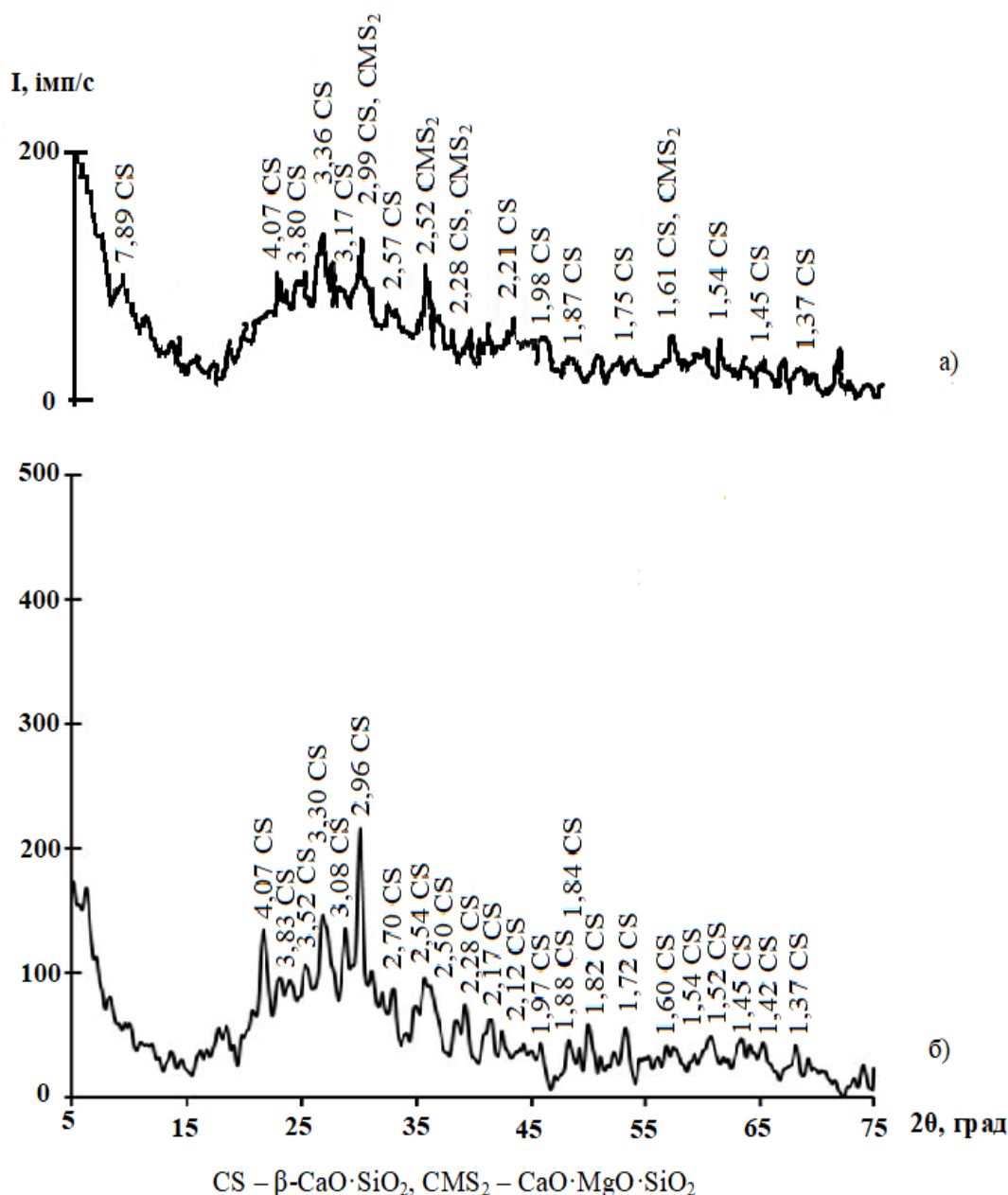


Рис. 4. Рентгенограма дослідних зразків із вмістом а) 15 мас. % золи ТЕС, б) 15 мас. % золи ТЕС з добавкою 3 мас. ч. МКВ

Fig. 4. X-ray pattern of experimental samples containing: a) 15 wt. % FPS ash, b) 15 wt. % FPS ash with an additive of 3 mass. h. MCV

За умови використання 15 % золи ТЕС як газоутворюючої добавки основними фазами є воластоніт (CS) та діопсид (CMS₂) (рис. 4а). З рис. 4б видно, що у зразку із добавкою 3 мас. ч. МКВ основна фаза – воластоніт (CS).

Основними фазами у зразку з вмістом 10 мас. % мартенівського шлаку є анортит (CAS₂), воластоніт (CS) та кварц (рис. 5а), а після введення мікроволастоніту – воластоніт (CS) (рис. 5б).

Слід зазначити, що практично для всіх проб спостерігається зниження кількості

кристалічної фази за додавання 3 мас. ч. мікроволастоніту. Це може бути пов'язане з його флюсуючою дією.

Для зразків із використанням в якості газоутворюючої добавки матеріалів різного походження, а саме: суглинку та мартенівського шлаку з вмістом 3 мас. ч. МКВ та без нього було проведено дослідження кількісного вмісту кристалічної фази за методикою, описаною вище.

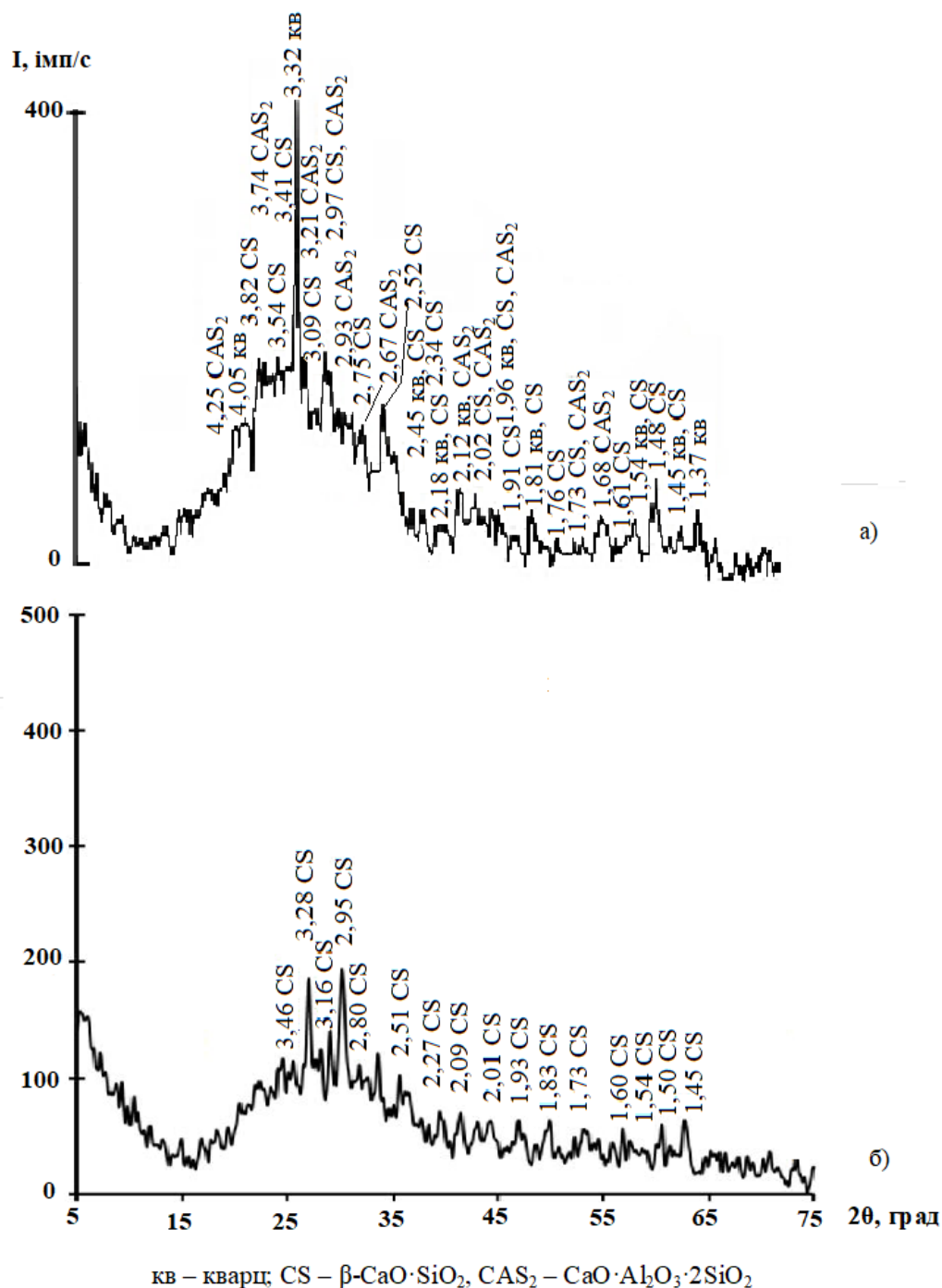


Рис. 5. Рентгенограма дослідних зразків із вмістом а) 10 мас. % мартенівського шлаку, б) 10 мас. % мартенівського шлаку з добавкою 3 мас. ч. МКВ

Fig. 5. X-ray pattern of experimental samples containing: a) 10 wt. % open-hearth furnace slag, b) 10 wt. % open-hearth furnace slag with an additive of 3 mass. h. MCV

Встановлено, що за використання в якості газоутворювача суглинку кількість кристалічної фази в випалених зразках становить 18 %, після додавання мікроволастоніту вона зменшується до 15 %. За використання ж мартенівського шлаку

кількість кристалічної фази з 12 % зменшується до 11 % (табл. 2).

Залежність об'ємної ваги (а), міцності на стиск (б) та ККЯ (в) дослідних зразків з вмістом різних газоутворювачів (табл. 1) від кількості добавки МКВ наведена на рис. 6.

The content of the crystalline phase in the experimental samples

Таблиця 2

№ складу за табл.1	Вміст кристалічної фази в дослідних зразках	
	Склофази	Кристалічної фази
15	88	12
17	89	11
21	82	18
23	85	15

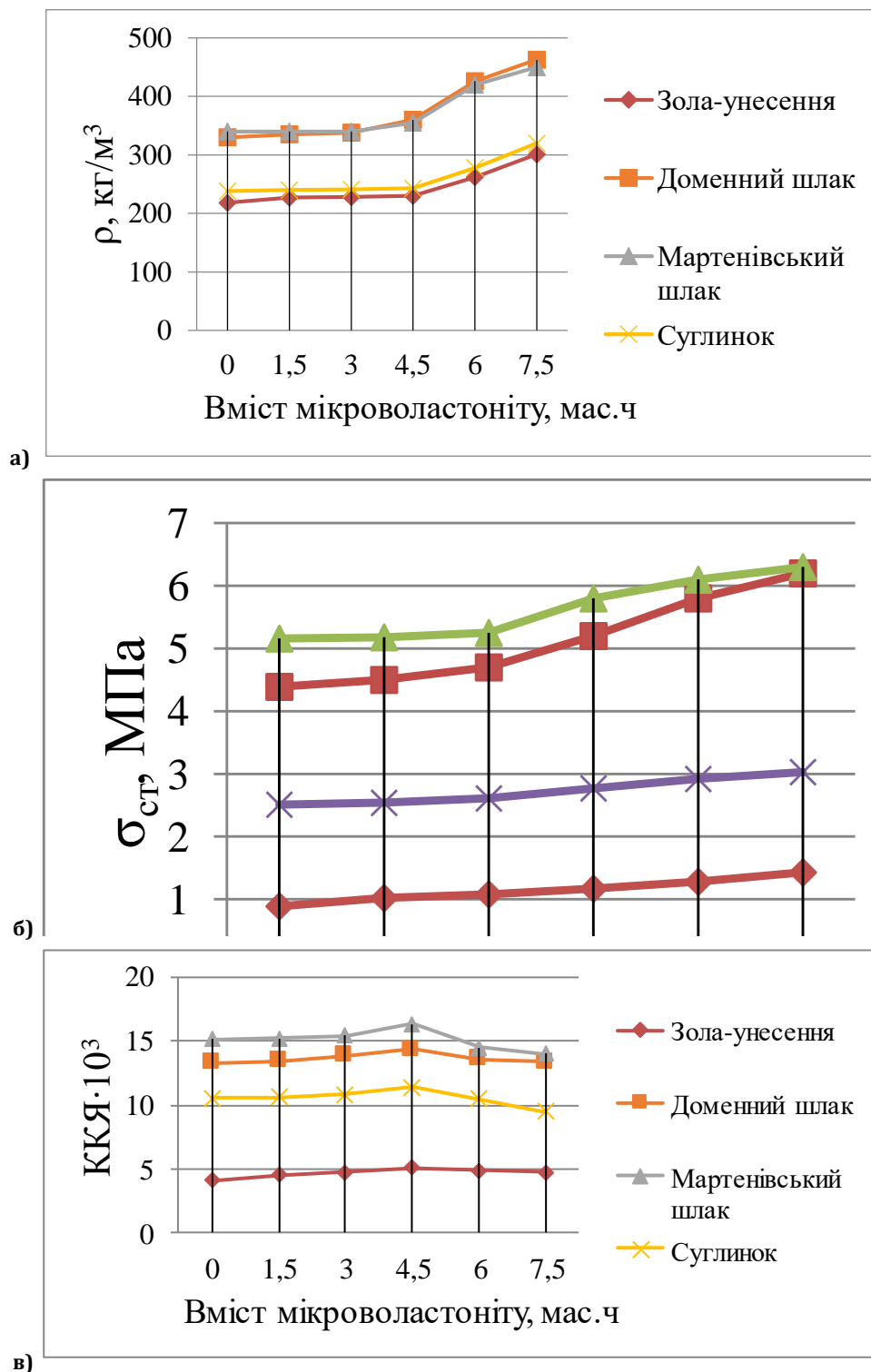


Рис. 6. Залежність об'ємної ваги (а), міцності на стиск (б) та ККЯ (в) дослідних зразків з вмістом різних газоутворювачів від кількості добавки МКВ

Fig. 6. Dependence of volumetric weight (a), compressive strength (b) and CCQ (c) of experimental samples with the content of different gas-forming agents on the amount of MCV additive

Отримані дані (рис. 6) підтверджують можливість отримання ПСКМ з використанням недефіцитної природної та вторинної сировини в якості газоутворюючих добавок комплексної дії з широкими інтервалами щільності (від 218 до 460 кг/м³) та міцності на стиск (від 0.89 до 6.3 МПа). Найменшими значеннями міцності (0.89 МПа) та ККЯ ($4.08 \cdot 10^{-3}$) характеризуються зразки, що містять золу-унесення, які є майже аморфними (рис. 4а). Максимальними значеннями ККЯ ($15.17-16.33 \cdot 10^{-3}$) характеризуються зразки, що містять мартенівський шлак. Як видно з рис. 6, за умови додавання МКВ спостерігається

підвищення об'ємної ваги (рис. 6а), особливо за його введення понад 4.5 мас. ч., та міцності на стиск (рис. 6б) дослідних ПСКМ. Слід зауважити, що ККЯ (рис. 6в) зразків спочатку збільшується, але за вмісту МКВ понад 4.5 мас. ч. спостерігається зниження його показників за рахунок пригнічення процесу случування та підвищення об'ємної ваги матеріалів.

Оскільки зразок складу №18 (табл. 1), що вміщував 10 мас. % мартенівського шлаку та 4.5 мас. ч. МКВ, характеризувався найбільшими значеннями ККЯ, то мало інтерес дослідження його фазового складу (рис. 7).

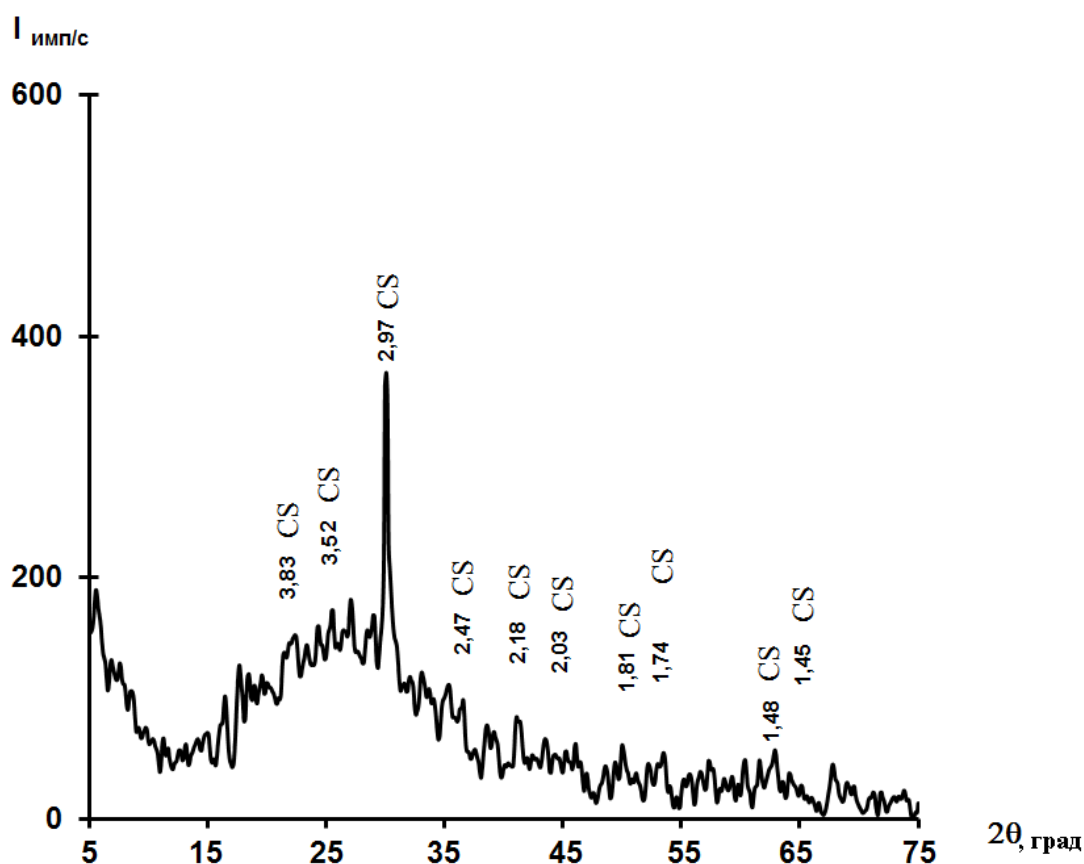


Рис. 7. Рентгенограма дослідного зразка із вмістом 10 мас. % мартенівського шлаку з добавкою 4.5 мас. ч. МКВ

Fig. 7. X-ray pattern of experimental sample containing 10 wt. % open-hearth furnace slag with an additive of 4.5 mass. h. MCV

Як видно з рис. 7, введення такої кількості МКВ сприяє підвищенню вмісту воластоніту в порівнянні зі зразком без вмісту МКВ та із вмістом 3 мас. ч. МКВ (рис. 5). Тому відмічене збільшення міцностних показників отриманого ПСКМ можна пояснити вбудовою кристалів воластоніту у скломатрицю міжпорових перегородок, що забезпечує

армуючий ефект для матеріалу в цілому, описаний авторами [27; 28].

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено позитивний вплив добавки мікрволастоніту в кількості 1.5–4.5 мас. ч. на властивості ПСКМ з вмістом в якості газоутворюючих добавок суглинку та матеріалів техногенного походження, а саме:

мартенівського та доменного шлаків і золи-унесення, що випалені за різних температур (750 та 850 °С). Відмічено підвищення ККЯ дослідних зразків в середньому на 10 % за введення МКВ до 4.5 мас. ч. Найбільші значення ККЯ ($15.17-16.33 \cdot 10^{-3}$) мали матеріали, що містять мартенівський шлак.

Встановлено, що добавка МКВ сприяє розм'якшенню скла за більш низької температури та утворенню воластоніту як основної кристалічної фази в ПСКМ після випалу.

References

- [1] Silva, R. C., Puglieri, F. N., Chiroli, D. M. G., Bartmeyer, G. A., Kubaski, E. T., Tebcherani, S. M. (2021). Recycling of Glass Waste into Foam Glass Boards: a Comparison of Cradle-to-Gate Life Cycles of Boards with Different Foaming Agents. *Science of the Total Environment*, (771), 145276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145276>
- [2] Orlov, D.S. (2000). [Thermal Insulation Materials Based on Glass]. *Stroyka*, (22), 12–14 (in Russian).
- [3] Pavlov, V. F. (2003). [The Method of Involving Industrial Waste in the Production of Building Materials]. *Stroitel'nyye materialy*, (8), 28–30 (in Russian).
- [4] Shchukina, L. P., Galushka, Y. O., Savenkov, A. S., Khlopitsky, A. A. (2020). [Prospects for the use of ash and slag materials for the production of building heat-insulating ceramics]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (3), 215–224 (in Russian).
- [5] Scarinci, G., Brusatin, G., Bernardo, E. (2006). Glass foams. *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, 158–176. <https://doi.org/10.1002/3527606696.ch2g>
- [6] Dyatlova, E. M., Gailevich, S. A., Minenkova, G. Y., Radchenko, S. L. (2002). [Refractory heat-insulating materials obtained by foam and gas formation methods]. *Steklo i keramika - Glass and ceramics*, (2), 20–23 (in Russian).
- [7] König, J., Petersen, R. R., Yue, Y., Suvorov, D. (2017). Gas-releasing reactions in foam-glass formation using carbon and Mn_xO_y as the foaming agents. *Ceramics International*, 5(43), 4638–4646. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.133>
- [8] König, J., Petersen, R. R., Yue, Y. (2016). Influence of the glass particle size on the foaming process and physical characteristics of foam glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, (447), 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.05.021>
- [9] Lotov, V. A. (2000). [Control of the process of formation of the structure of porous materials]. *Stroitel'nyye materialy*, (9), 26–28 (in Russian).
- [10] Spiridonov, Yu. A., Orlova, L. A. (2003). [Problems of obtaining foam glass]. *Steklo i keramika - Glass and ceramics*, (10), 10–11 (in Russian).
- [11] Lotov, V. A., Krivenkova, E. V. (2002). [Kinetics of the process of formation of the porous structure of foam glass]. *Steklo i keramika - Glass and ceramics*, (3), 14–17 (in Russian).
- [12] Yashchishin, Y. M. (2008). [Glass technology in three parts: Part 1. Physics and chemistry of glass]. Lviv, Ukrain: Vidavnistvo "Beskyd Bit" (in Ukrainian).
- [13] Zanotto, E. D. (2013). Glass crystallization research – a 36-year retrospective. Part II, methods of study and glass-ceramics. *Journal of Applied Glass Science*, 2(4), 117–124. <https://doi.org/10.1111/ijag.12024>
- [14] Zanotto, E. D. (2013). Glass crystallization research – a 36-year retrospective. Part I, fundamental studies. *Journal of Applied Glass Science*, 2(4), 105–116. <https://doi.org/10.1111/ijag.12022>
- [15] Sopegin, G. V., Semeynykh, N. S. (2016). [Preparation of the initial components of the charge in the production of granulated foam glass]. *Master's journal*, (2), 44–54 (in Russian).
- [16] Smiljanić, S., Hribar, U., Spreitzer, M., König, J. (2021). Influence of additives on the crystallization and thermal conductivity of container glass cullet for foamed glass preparation. *Ceramics International*, 23(47), 32867–32873. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.183>
- [17] Zhakinbaev, B. E., Spiridonov, Yu. A., Sigae, V. N. (2013). [The use of rocks to produce foam glass]. *Steklo i keramika - Glass and ceramics*, (4), 47–50 (in Russian).
- [18] Zheng, W. W., Sun, H. J., Peng, T. J., Zeng, L. (2020). Novel preparation of foamed glass-ceramics from asbestos tailings and waste glass by self-expansion in high temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, (529), 119767. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119767>
- [19] Voloshin, V. M. (2006). *Ukraine Patent No. 19033*. Kyiv, Ukraine.
- [20] Smolii, V. A., Yatsenko, E. A. (2010). [TPP slags are the main raw material component of foamed slag glass]. *Zbirnyk naukovykh prats' VAT «UkrNDIVohnetryviv imeni A.S. Berezhnoho» - Collection of scientific works of OJSC "UkrNDIVohnetryviv named A.S. Berezhnyh"*, (110), 466–471 (in Russian).
- [21] Yatsenko, E. A., Smolii, V. A., Kosarev, A. S., Dzyuba, E. B., Glushko, I. S., Goltsman, B. M. (2013). [Physico-chemical properties and structure of foam-slag glass based on TPP waste]. *Steklo i keramika - Glass and ceramics*, (1), 3–6 (in Russian).
- [22] Lotov, V. A. (2011). [Obtaining foam glass based on natural and technogenic aluminosilicates]. *Steklo i keramika - Glass and ceramics*, (9), 34–37 (in Russian).
- [23] Kazuyoshi, T., Hironobu, A., Kazuo, K. (1974). *Japanese Patent No. 49036806*.
- [24] Koltsova, Y. I., Nikitin, S. V. (2019). [Study of the influence of the burning mode and the addition of microwollastonite on the crystallization of porous glass-crystalline materials and their physical and mechanical properties]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (5), 48–53 (in Ukrainian).
- [25] Beliy, Y., Koltsova, Y., Nikitin, S. (2013). Production of porous glass-crystalline materials using different types of natural and recycled resources. *Journal of chemical technology and metallurgy*, 48(4), 396–406.
- [26] Koltsova, Y. I., Nikitin, S. V., Petukh, S. I. (2018). [Investigation of the influence of temperature-time modes of burning on the structure of porous glass-crystalline materials]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (2), 79–85 (in Ukrainian).

-
- [27] Korobshchikova, T. S., Orlova, N. A. (2011). [Modeling of the mechanical properties of a paintwork material filled with wollastonite]. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, (1-2), 62-63 (in Russian).
- [28] Shevchenko, V. P. (2000). [The use of wollastonite in the ceramic industry]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, (4), 31-32 (in Russian).