

УДК 691.5

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ГІДРАТАЦІЇ
ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ,
МОДИФІКОВАНИХ ВІДХОДАМИ СКЛЯНОГО БОЮ**

Бондаренко О.П., к.т.н., доцент,
Москаленко О.А., аспірант,
Захарченко К.Д., магістр,
Новоселенко Є.Д., студент,

Київський національний університет будівництва і архітектури
bond_olya@mail.ru

Анотація. Досліджено вплив склопорошку на кінетику набору шлакопортландцементу, модифікованого відходами скляного бою. В результаті оптимізації отримана область існування складів в'язучої речовини, обмеженої по осі X_1 від 25 до 55%, по осі X_2 від 5 до 7,5% і по осі X_3 значеннями В/Ц від 0,243 до 0,33, що дозволяє отримувати штучний камінь, який характеризується міцністю при стиску 30,0...106,0 МПа протягом 2...90 діб твердіння. Вивчено продукти гідратації та склад новоутворень штучного каменю та показано, що високі значення міцності при стиску забезпечуються за рахунок синтезу низькоосновних гідросилікатів кальцію, гідрогранатів і цеолітоподібних кальцієвих гідроалюмосилікатів типу вайкаріту, жисмондіну та епістільбіту та натрієвокальцієвих гідроалюмосилікатів типу гонардіту та томсоніту.

Ключові слова: гранульований доменний шлак, шлакопортландцемент, склопорошок, модифікація, міцність при стиску, структуроутворення.

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ
И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОТХОДАМИ СТЕКЛЯННОГО БОЯ**

Бондаренко О.П., к.т.н., доцент,
Москаленко А.А., аспірант,
Захарченко Е.Д., магістр,
Новоселенко Е.Д., студент

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
bond_olya@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние стеклопорошка на кинетику набора прочности шлакопортландцемента, модифицированного отходами стеклянного боя. В результате оптимизации получена область существования составов вяжущего вещества, ограниченная по оси X_1 от 25 до 55%, по оси X_2 от 5 до 7,5% и по оси X_3 значениями В/Ц от 0,243 до 0,33, позволяющая получать искусственный камень, характеризующийся прочностью при сжатии 30,0...106,0 МПа в промежутке 2...90 суток твердения. Изучены продукты гидратации и состав новообразованного искусственного камня и показано, что высокие значения прочности при сжатии обеспечиваются за счет синтеза низкоосновных гидросиликатов кальция, гидрогранатов и цеолитоподобных кальциевых гидроалюмосиликатов типа вайкарита, жисмондина и епистильбита и натриевокальциевых гидроалюмосиликатов типа гоннардита и томсонита.

Ключевые слова: гранулированный доменный шлак, шлакопортландцемент, стеклопорошок, модификация, прочность при сжатии, структурообразование.

FEATURES HYDRATION AND STRUCTURE FORMATION OF SLAGPORTLAND CEMENT, MODIFIED GLASS WASTE COMBAT

Bondarenko O.P., PhD., Assistant Professor

Moskalenko O.A., postgraduate,

Zaharchenko K.D., Master

Novoselenko E.D., Student

Kyiv National University of Construction and Architecture,

bond_olya@mail.ru

Abstract. The effect of glass powder on the kinetics of curing materials based on Portland slag cement is investigated. As a result of optimizing the domain of existence it is obtained binder composition, limited by the axis X_1 from 25 to 55% of the axis X_2 from 5 to 7,5% and the X_3 axis values of W/C from 0,243 to 0,33, allowing to obtain an artificial stone, characterized by a compressive strength of 30...106 MPa in the range 2...90 days of hardening. Studied the hydration products and the composition of the artificial stone tumors and show that high values of compressive strength provided by the synthesis of low basic calcium Hydro silicates, hydro garnets and zeolite-type calcium hydro aluminosilicates vaukarite, gismondine, epistilbite and sodium and calcium hydroaluminosilicates type gonnardite and thomsonite.

Keywords: granulated blast furnace slag, Blast-furnace cement, glass powder, compressive strength, modification, gelation.

Вступ. Скляний бій – нерозчинний відхід, який засмічує ґрунтовий шар землі, тому підлягає переробці або відповідному захороненню. Однак з економічної та екологічної точки зору захоронення не є доцільним внаслідок збитків, які завдаються навколишньому середовищу. Найбільш ефективно утилізувати мінеральні відходи у виробництві будівельних матеріалів [1-3].

Теоретичним посиланням на створення в'язучих матеріалів та виробів на основі скляного бою слугувало те, що бій скла за своїм хімічним складом наближається до осадових та метаморфічних порід типу натроліту, морденіту, анальциму, шабазиту та інших. Крім того, скло є корозійностійким матеріалом, здатним витримувати агресивні середовища. З вищевикладеного актуальним є застосування бою тарного скла, як мінеральної сировини з заданими характеристиками, що дає змогу вирішувати екологічні і економічні питання, а також створювати високоякісні матеріали та вироби спеціального призначення [4, 5].

Аналіз останніх досліджень. Одним із способів утилізації скляного бою є його використання в якості підстильної основи для дорожнього полотна (основа для доріг, дренажі в землі, закладки) [6]. Отриманий матеріал, в якому замість щебеню застосовується скляний бій, характеризується меншою вартістю, стійкістю до навантажень під тиском і ударом та гарними дренажними властивостями.

Дослідженнями, проведеними авторами [7], показано можливість розробки ефективної технології, що дозволяє використовувати бій скла не тільки як заповнювач, але і в якості основного компонента в'язучої речовини. Перетворення тонкодисперсного порошку в'язучої речовини на основі бою скла в каменевидне тіло відбувається в результаті взаємодії компонентів, що входять до його складу, з водним розчином лугів. У результаті отримані будівельні вироби мають середню густину 500...2400 кг/м³, міцність 0,5...25,0 МПа і коефіцієнт теплопровідності від 0,13 Вт/(м·К).

Використання порошку скла в якості в'язучого компонента в кераміці та цеглі дозволяє замінити мінеральні в'язучі, такі як глина. При цьому в деяких випадках збільшується морозостійкість, знижується температура розм'якшення та час випалювання [8].

Дослідженнями [9, 10] показано можливість одержання захисних матеріалів на основі скло- та шлаковміщуючих портландцементних композицій за рахунок хімічної стійкості шлакового скла.

Проте в вищенаведених роботах недостатньо досліджено взаємозв'язок кінетики

набору міцності і процесів структуроутворення штучного каменю, який містить відходи скляного бою.

Мета і завдання. Мета даної роботи полягає в дослідженні процесів гідратації та структуроутворення шлакопортландцементів, модифікованих відходами скляного бою. Розроблені матеріали можуть бути використані для отримання виробів спеціального призначення.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити вплив скляного порошку і гранульованого доменного шлаку на кінетику набору міцності модифікованого шлакопортландцементу;
- вивчити продукти гідратації та склад новоутворень шлакопортландцементу, модифікованого відходами скляного бою;
- пояснити взаємозв'язок складу продуктів гідратації та кінетики набору міцності штучного каменю;
- встановити можливі галузі використання розроблених матеріалів.

Об'єкти і методи дослідження. Для отримання в'язучої речовини зі змінним вмістом гранульованого доменного шлаку (ГДШ) і склопорошку (СП) в якості сировинних компонентів використовували: портландцемент ПЦ І-500-Н ПАТ виробництва «Волинь-Цемент» (ДСТУ В.2.7-46: 2010), ГДШ виробництва ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е. Дзержинського» (ТУ У В.2.7.-27.1-05393043-113: 2010), бій тарного скла виробництва ПП «МП «ТОПАЗ» м. Стрий, Львівська обл.

В'язучі речовини отримували шляхом сумісного помелу ПЦ І-50-Н, ГДШ та склобою по відкритому циклу до питомої поверхні 3550 см²/г (за Блейном).

Як дрібний заповнювач використовували Дніпровський річковий пісок з модулем крупності $M_{кр} = 1,47$, середньою густиною – 1420 кг/м³, пустотністю – 42%, істинною густиною – 2,63 г/см³, з вмістом пилоподібних і глинистих домішок – 1,6%. Повний залишок на ситі № 063 – 4,5% за масою.

Твердіння стандартних зразків здійснювалося в камері при нормальних умовах протягом 2, 7, 28 і 90 діб.

Для розкриття механізму процесів синтезу міцності розроблених в'язучих композицій досліджено продукти їх гідратації та склад новоутворень з використанням рентгено-фазового і диференціально-термічного аналізів та електронної мікроскопії.

Результати досліджень. Для реалізації поставленої мети подальші дослідження були реалізовані за допомогою трифакторного симплекс-центрального методу планування експерименту в математичному середовищі Statistica 12.0.

Як фактори варіювання були обрані: кількість гранульованого доменного шлаку (ГДШ),%, (фактор X_1), кількість склопорошку (СП),%, (фактор X_2) і В/Ц (фактор X_3), зміна яких представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Фактори варіювання

Фактори, вид		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
натуральний	кодований	нижній	верхній	
		0	1	
ГДШ, %	X_1	20	60	40
СП, %	X_2	5	15	10
В/Ц	X_3	0,24	0,36	0,12

В якості вихідних параметрів обрано зміну міцності при стиску залежно від часу твердіння. Матриця експерименту і його математична реалізація приведена в табл. 2.

В результаті моделювання отримані рівняння регресії і побудовані тернарні поверхні змін вихідних параметрів залежно від змін факторів, що варіюються (рис. 1).

Рівняння регресії:

$$fck.cube^2, \text{ МПа} = 10X_1 + 20X_2 + 24X_3 + 30X_1X_2 + 52X_1X_3 - 13X_2X_3 + 119,7X_1X_2X_3;$$

$$fck.cube^7, \text{ МПа} = 19X_1 + 36X_2 + 37,5X_3 + 32X_1X_2 + 99X_1X_3 - 12X_2X_3 + 376,5X_1X_2X_3;$$

$$fck.cube^{28}, \text{ МПа} = 34X_1 + 31,5X_2 + 37,5X_3 + 50,2X_1X_2 + 97X_1X_3 + 62X_2X_3 - 733,8X_1X_2X_3;$$

$f_{ck.cube}^{90}$, МПа = $30X_1 + 50X_2 + 36,5X_3 + 50X_1X_2 + 291X_1X_3 + 7X_2X_3 - 410,4X_1X_2X_3$.

Аналіз отриманих рівнянь регресії показав, що фактори X_1 , X_2 і X_3 значущі і встановлюють взаємозв'язок між змінними варійованими факторами $X_1...X_3$.

Таблиця 2 – Матриця експерименту

Точки плану	Матриця плану в кодованих величинах			Матриця плану в натуральних величинах			Вихідні параметри			
	X_1	X_2	X_3	ГДШ, %	СП, %	В/Ц	$f_{ck.cube}^2$, МПа	$f_{ck.cube}^7$, МПа	$f_{ck.cube}^{28}$, МПа	$f_{ck.cube}^{90}$, МПа
1	0,00	1,00	0,00	20,0	15,0	0,24	20,0	36,0	31,5	50,0
2	0,33	0,33	0,33	33,3	8,33	0,28	30,1	58,0	30,4	62,3
3	1,00	0,00	0,00	60,0	5,00	0,24	10,0	19,0	34,0	30,0
4	0,50	0,50	0,00	40,0	10,0	0,24	22,5	35,5	45,3	52,5
5	0,00	0,00	1,00	20,0	5,00	0,36	24,0	37,5	37,5	36,5
6	0,50	0,00	0,50	40,0	5,00	0,30	30,0	53,0	60,0	106
7	0,00	0,50	0,50	20,0	10,0	0,30	18,8	33,8	50,0	45,0

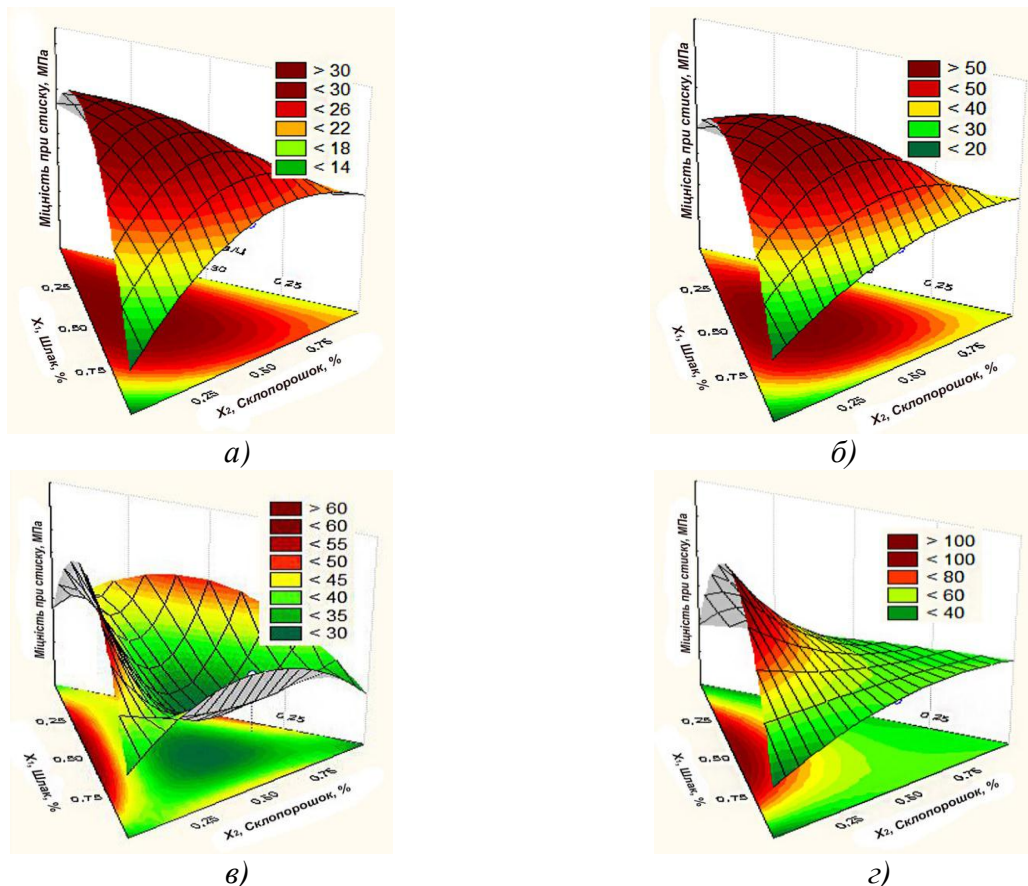


Рис. 1. Тернарні поверхні зміни міцності при стиску (МПа) матеріалу на основі шлакопортландцементу, модифікованого відходами скляного бою після твердіння в нормальних умовах, доби: а – 2; б – 7; в – 28; г – 90

На збільшення міцності після 2 і 7 діб тверднення (рис. 1, а, б) впливає одночасне збільшення кількості ГДШ від 20 до 56% (фактор X_1), СП від 5 до 12,5% (фактор X_2) і В/Ц від 0,243 до 0,28 (фактор X_3). Максимальною міцністю при стиску – 30,1 і 58,0 МПа характеризується штучний камінь, що містить ГДШ і СП в кількості 33,3 і 8,33% при В/Ц =

0,28. Після 28 діб тверднення зразків досліджуваного матеріалу відзначено радикальна зміна ізоляційної міцності на тернарних поверхнях відгуку (рис. 1, в). Область максимальних значень обмежується по X_1 кількістю ГДШ від 25 до 55%, по осі X_2 кількістю СП до 6% і по осі X_3 В/Ц від 0,243 до 0,33. За даними оптимізації, максимальною міцністю – 60,0 МПа (рис. 1, в) характеризується штучний камінь, що містить ГДШ в кількості 40%, СП в кількості 5% при В/Ц = 0,3. Після 90 діб тверднення (рис. 1, г) міцність штучного каменю підвищується. На її зростання істотно впливає зміст СП у складі в'язучої речовини від 5 до 7,5% (фактор X_2). За даними оптимізації, максимальною міцністю – 106,0 МПа (рис. 1, г) характеризується штучний камінь, що містить ГДШ в кількості 40%, СП в кількості 5% при В/Ц = 0,3.

При введенні 5% СП до складу шлакопортландцементу, що вміщує оптимальну кількість ГДШ в кількості 40% на кривій РФА (рис. 2, кр. 1) відмічені незначні кількості високоосновних гідросилікатів кальцію типу C_2SH_2 ($d=0.307$; 0.280 ; 0.240 ; 0.200 ; 0.183 нм), $C_2SH(B)$ ($d=0.477$; 0.335 ; 0.304 ; 0.292 ; 0.196 нм) і $C_5S_3H_3$ ($d=0.335$; 0.293 ; 0.246 ; 0.230 ; 0.196 ; 0.182 нм), наявність яких підтверджується ендоефектами при температурах (-)120-150, (-) 540-600 і (-)650-700°C (рис. 3, кр. 1), які характерні для дегідратації вище зазначених фаз.

Незважаючи на наявність ліній $d=0.491$ і 0.262 нм, характерних для портландиту, його утворення не підтверджується даними термічного аналізу – на кривій ДТА відсутній ендоефект при температурі (-)585°C (рис. 3, кр. 1), характерний для цього мінералу. Також не зафіксовані дифракційні сплески еtringіту та вихідних мінералів ГДШ, незважаючи на наявність на поверхні сколку часток ГДШ (рис. 4, а, б).

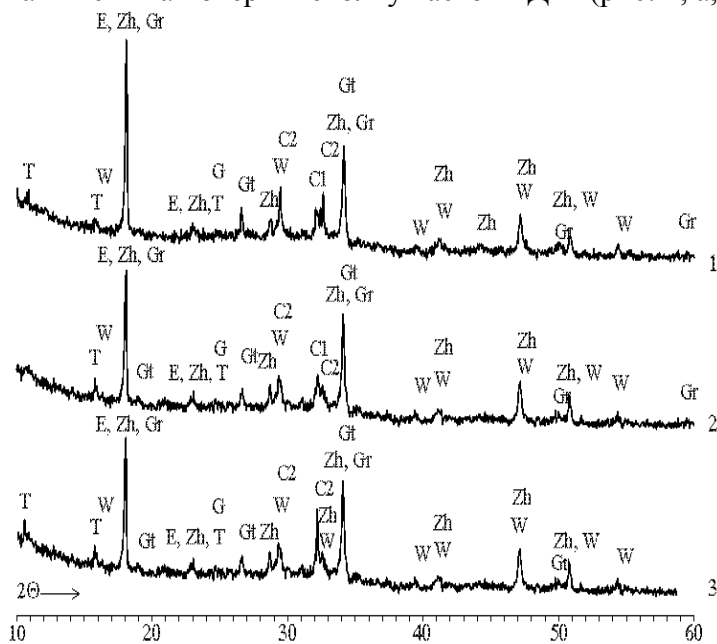


Рис. 2. Рентгенограми штучного каменю на основі шлакопортландцементу з вмістом оптимальної кількості шлаку (40%) на 28 добу тверднення, модифікованого відходами скляного бою в кількості, %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15.

Позначення: Т – томсоніт; Е – епістильбіт; W – вайкаріт; Zh – жисмондін; Gr – гонардіт; G – гіроліт; Gt – гідрогранати; C1 – $C_2SH(B)$; C2 – $CSH(B)$

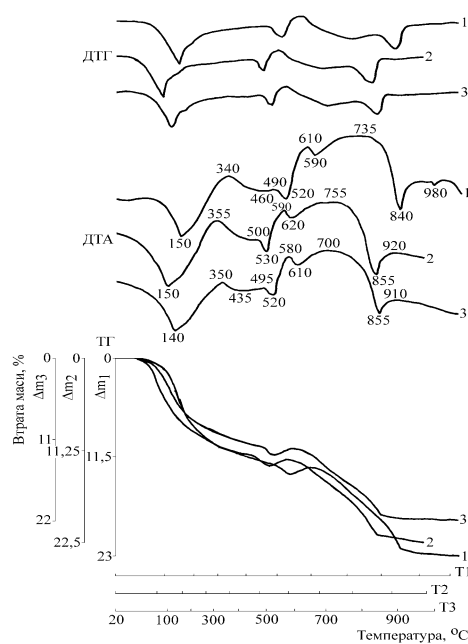


Рис. 3. Дериваторами штучного каменю на основі шлакопортландцементу з вмістом оптимальної кількості шлаку (40%) на 28 добу тверднення, модифікованого відходами скляного бою в кількості, %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15

Для підвищення міцності штучного каменю в даній композиції на 28 добу тверднення, на наш погляд, вагомий внесок роблять низькоосновні гідросилікати кальцію $CSH(A)$, $CSH(B)$ ($d=0.304$; 0.301 ; 0.278 ; 0.226 ; 0.180 ; 0.167 нм), $C_2S_3H_2$ ($d=0.382$; 0.335 нм), дегідратація при температурах (-)150 і (-)520, 590 і 840°C (рис. 3, кр. 1), $C_2AS_xH_{(6-2x)}$ ($d=0.28$ - 0.72 нм), дегідратація при температурі (-)460°C (рис. 3, кр. 1) сумісно з цеолітоподібними

кальцієвими гідроалюмосилікатами – вайкарітом $\text{Ca}_8\{\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ($d=0.306\text{-}0.304$; 0.277 ; 0.266 ; 0.217 ; 0.193 ; 0.169 нм), гонардітом $(\text{Ca}, \text{Na})\{\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{15}\}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($d=0.49$; 0.46 ; 0.356 ; 0.294 ; 0.262 ; 0.221 ; 0.191 ; 0.183 ; 0.156 нм), жисмондіном $\text{Ca}\{\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8\}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($d=0.53$; 0.503 ; 0.491 ; 0.447 ; 0.402 ; 0.335 ; 0.307 ; 0.274 ; 0.270 ; 0.262 ; 0.219 ; 0.201 ; 0.193 ; 0.191 нм), томсонітом $(\text{Ca}, \text{Na})\{\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8\}\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ($d=0.8$; 0.52 ; 0.44 ; 0.382 ; 0.332 ; 0.266 ; 0.243 ; 0.226 ; 0.217 ; 0.201 нм) і епістільбітом $\text{Ca}_3\{\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}\}\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ($d=0.491$; 0.442 ; 0.402 ; 0.387 ; 0.382 ; 0.333 ; 0.306 ; 0.278 ; 0.243 ; 0.218 ; 0.193 ; 0.178 нм). Дегідратація цеолітоподібних кальцієвих гідроалюмосилікатів відбувається за температур (-) 840 і 980°C (рис. 3, кр. 1).

За даними електронної мікроскопії (рис. 4, а, б) мікроструктура штучного каменю, що вміщує 5% СП, щільна, малопориста, частки ГДШ та СП склеєні поміж собою приховано кристалічними фазами гідросилікатів кальцію різної етіології. Фіксуються кристали, які характерні для жисмондіну та епістільбіту.

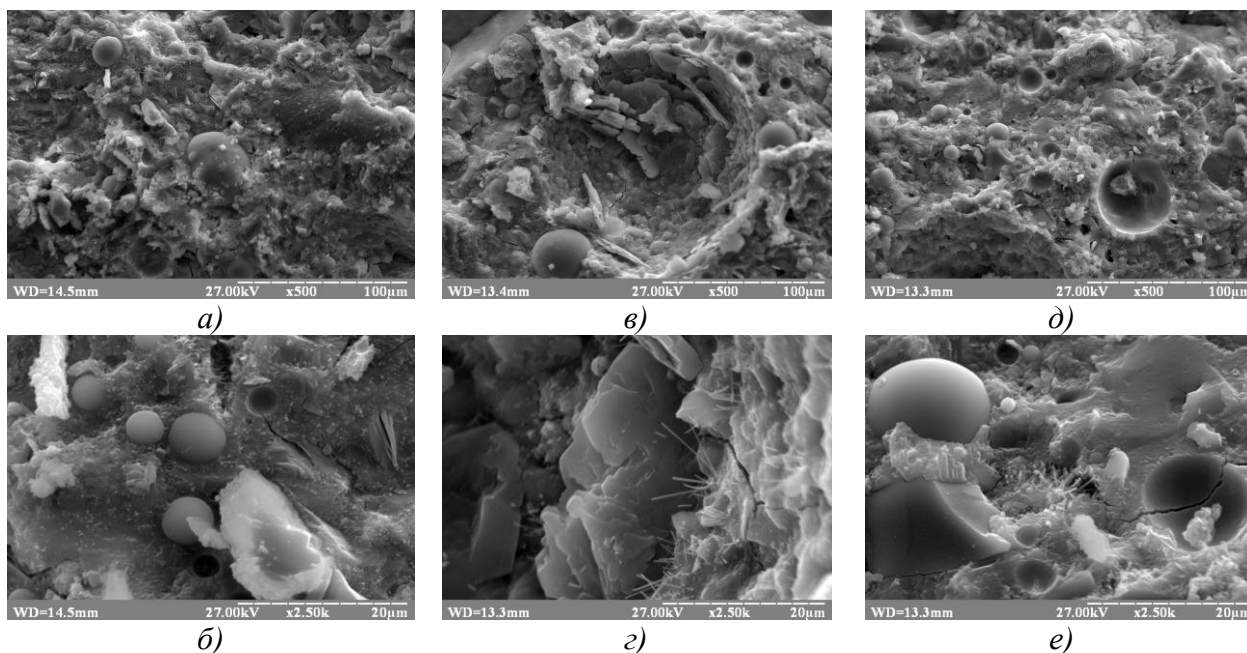


Рис. 4. Електронні мікрофотографії поверхні сколу штучного каменю на основі шлакопортландцементу з вмістом оптимальної кількості шлаку (40%) на 28 добу тверднення, модифікованого відходами скляного бою в кількості, %:
а, б – 5; в, г – 10; д, е – 15

Збільшення кількості СП від 5 до 10% до складу шлакопортландцементу, що вміщує оптимальну кількість ГДШ в кількості 40%, суттєво не впливає на процес структуроутворення (рис. 2 – рис. 3, кр. 2), але призводить до більш чіткої кристалізації низькоосновних гідросилікатів кальцію виду $\text{CSH}(\text{B})$ і $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ – волокнисті кристали (рис. 4, в, г) і вайкаріту з жисмондіном – кристали пластинчато-призматичного вигляду. Слід зазначити, що інтенсивності високоосновних гідросилікатів кальцію зменшуються (рис. 2, кр. 2) в порівнянні з попереднім випадком.

Уведення до складу шлакопортландцементу, що вміщує оптимальну кількість ГДШ (40%), СП в кількості 15% не сприяє підвищенню міцності при стиску композицій, що досліджувались (рис. 1, в). Структуроутворення відбувається по вище описаному механізмі (рис. 2 – рис. 3, кр. 3), але з деякими особливостями, а саме: зазначена кількість ГДШ майже повністю зв'язує портландит в $\text{CSH}(\text{B})$, частка портландиту, що залишилася, реагує зі склопорошком в напрямку синтезу цеолітоподібних фаз виду вайкаріту, гонардіту, жисмондіну, томсоніту та епістільбіту. При цьому, структура штучного каменю стає ще більш щільною та менш дефектною (рис. 4, д, е); спостерігаються епітаксціальні зрощення кристалів $\text{CSH}(\text{B})$ із кристалами епістільбіту. Залишок частинок склопорошку, що не вступив в хімічно реакцію, виконує роль мікронаповнювача. Для його активації, по даним роботи [2],

потрібен луг. Лужна активація дозволила б змінити процес структуроутворення штучного каменю в напрямку збільшення частки цеолітоподібних фаз і значно підвищити міцність каменю в більш пізні строки твердіння.

Висновки. Дослідженнями, наведеними в даній роботі, доведено можливість використання порошку скляного бою тарного скла в якості активної мінеральної добавки, що впливає на кінетику нарощування міцності при стиску та процеси структуроутворення матеріалу. У результаті оптимізації отримана область існування складів в'язучої речовини, обмеженої по осі X_1 від 25 до 55%, по осі X_2 від 5 до 7,5% і по осі X_3 значеннями В/Ц від 0,243 до 0,33, що дозволяє отримувати штучний камінь, який характеризується міцністю при стиску 30,0...106,0 МПа протягом 2...90 діб твердіння.

Високі значення міцності при стиску можливо пояснити за рахунок взаємодії склофази ГДШ і склопорошкової складової в'язучої речовини з портландитом в бік утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію, гідрогранатів і цеолітоподібних кальцієвих гідроалюмосилікатів типу вайкаріту, жисмондіну та епістільбіту та натрієвокальцієвих гідроалюмосилікатів типу гонардиту та томсоніту.

Запропоновані склади шлакопортландцементу, модифікованого відходами скляного бою, можуть бути рекомендовані для отримання бетонів спеціального призначення з прискореною кінетикою набору міцності, як на початкових так і на пізніх етапах твердіння, а також захисних покриттів для бетону.

Література

1. Пушкарьова К. К. Особливості виготовлення та перспективи застосування бетонів на основі лужних шлакопортландцементів / К.К. Пушкарьова, О.П. Бондаренко // Строительные материалы и санитарная техника. – 2008. – Вип. 29. – С. 72–80.
2. Бондаренко О.П. Швидкотверднучі лужні шлакопортландцементи та бетони на їх основі: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Бондаренко Ольга Петрівна. Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2009. – 21 с.
3. Пушкарьова К.К. Технологічні особливості виготовлення бетонів на основі лужних шлакопортландцементів: зб. наук. пр. / К.К. Пушкарьова, О.П. Бондаренко // Будівельні конструкції. – 2011. – Вип. 74, Книга 2. – С. 116–122.
4. Meyer C. Recycled glass from waste material to valuable resource / C. Meyer // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium, Dundee UK, 2001. – P. 1–10.
5. Ketov A.A. Peculiar chemical and technological properties of glass cullet as the raw material for foamed insulation / A.A. Ketov // Recycling and Reuse of Waste Materials: Proceedings of the International Symposium. Dundee UK, 2003. – P. 695–704.
6. Meland L. Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability / L. Meland, P.A. Dahl // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium. 19-20 March, 2001, Dundee UK. – P. 167-177.
7. Соломатов В.И. Структурообразование и свойства композитов на основе боя стекла / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев // Новосибирск: Изв. Вузов. Строительство, 2000. – № 9. – С. 16-22.
8. Барановский И.В. Использование отходов стекла в производстве облицовочных материалов / И.В. Барановский // Новые материалы на основе стекла для строительства: Сб. науч. тр. / ГосНИИ стекла. – М.: ГИС, 1989. – С. 77-80.
9. Бондаренко О.П. Стеклосодержащие шлакопортландцементные материалы / О.П. Бондаренко, С.Г. Гузий, Е.Д. Захарченко // Scientific Journal "Science Rise". – №11/2(16). – 2015. – С. 34-40. doi: 10.15587/2313-8416.2015.54099.
10. Бондаренко О.П. Разработка защитных материалов на основе стекло- и шлакосодержащих портландцементных композиций / О.П. Бондаренко, С.Г. Гузий, Е.Д. Захарченко, Е.Д. Новоселенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – №6/11(78) – 2015. – С. 41-47. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56577.