

УДК 666.943.3

*Г.М. Шабанова, А.М. Корогодська, В.М. Шумейко, О.М. Борисенко, Г.В. Лісачук,
Р.В. Кривобок, М.Д. Сахненко*

РОЗРОБКА СКЛАДІВ ШЛАКОЛУЖНИХ В'ЯЖУЧИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТРОТУАРНИХ ВИРОБІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

У роботі досліджено доменний гранульований шлак заводу «Камет-Сталь». Встановлено, що цей шлак відноситься до основних. За коефіцієнтом якості шлак відноситься до 1 сорту і може бути використаний для одержання шлаколужного в'язучого матеріалу за лужним способом активізації. Значна частина шлаку знаходиться в рентгеноаморфному стані, що сприяє одержанню міцного цементного каменю у пізні терміни тужавіння, а кристалічні фази шлаку проявляють слабкі в'язучі властивості та забезпечують міцність затверділому шлаколужному в'язучому матеріалу. Для активізації шлаку та пластифікації композиції до її складу введено портландцемент та глину, як лужні затворювачі використовували натрієве рідке скло, розчин соди каустичної та розчин соди кальцинованої. Виключення із базового складу глини приводить до збільшення міцності майже у два рази за рахунок додаткової активізації шлаку портландцементом. Значним недоліком у цьому випадку є чисельні висолі, які з'являються на зразках вже на першу добу тверднення. Таким чином, для прискорених термінів тужавіння, підвищеної механічної міцності, зменшення кількості висолів і суттєвого зниження собівартості готової продукції як оптимальний було обрано склад, що містить 91 мас.% шлаку; 6 мас.% глини; 3 мас.% портландцементу, затвореного розчином рідкого скла з модулем 2,3 та густиною 1300 кг/м³.

Ключові слова: шлаколужні в'язучі, тротуарні плити, лужні затворювачі, рідке скло, міцність, терміни тужавіння.

DOI: 10.32434/0321-4095-2023-150-5-147-154

Вступ

Цемент є одним із найбільш широко використовуваних будівельних матеріалів у світі, що пов'язано з простотою його експлуатації, довговічністю та універсальністю. Інтенсивне використання цементу зумовлене переважно зростаючими потребами в інфраструктурі та житлі. Враховуючи стрімке зростання населення та урбанізація, очікувані в усьому світі протягом наступних кількох десятиліть, вважається, що попит на цемент продовжуватиме зростати [1–4].

Сталий розвиток стає головним пріоритетом у всіх галузях, включаючи промисловість будівельних матеріалів, яка є третьою за величиною галуззю за викидами CO₂. Виробництво

3,0–3,6 Гт цементу на рік призводить до утворення близько 3,24 млрд т CO₂, що складає 5% загального обсягу викидів [5,6]. Відповідно до сучасних умов господарювання, а саме інтеграції економіки України у світовий економічний простір, висувають нові, насамперед, екологічні вимоги до принципів і пріоритетів підприємницької діяльності. Екологічна модернізація цементних підприємств є важливим інструментом з досягнення встановлених орієнтирів економічного розвитку країни відповідно до Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року». Саме це визначило постійні дослідження на глобальному рівні для пошуку рішень, що дозволять

© Г.М. Шабанова, А.М. Корогодська, В.М. Шумейко, О.М. Борисенко, Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, М.Д. Сахненко, 2023



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Development of compositions of slag-alkaline binding materials for pavement products

зменшити негативний вплив цементної промисловості на навколишнє середовище. Шляхи для досягнення такої мети багатогранні, починаючи з використання більш сталого палива до використання у виробництві цементу відходів інших виробництв [7–10].

Будь-які відходи можна розглядати як вторинні матеріальні ресурси, що можуть бути повністю або частково (як добавки) використовуватися при виробництві різних матеріалів. Останнім часом у виробництві будівельних матеріалів використовують шлаки, які за своїми фізичними та хімічними властивостями аналогічні магматичним породам, що містять основні силікати кальцію.

Шлаки чорної металургії, які раніше вважалися відходами, зараз традиційно використовуються у виробництві цементу. Домінуючий раніше мокрий спосіб виробництва цементу виключав їх використання, оскільки шлаки при зволоженні тужавіють. Але сьогодні все більше підприємств виробляють цемент сухим способом, що дає можливість розширити споживання шлаку як сировинного матеріалу.

Використання шлаку у виробництві цементу дає значні переваги, такі як нижча температура гідратації, більш висока сульфато- і кислотостійкість, нижча проникність та більш висока корозійна стійкість, а головне повторне використання побічних продуктів сталеплавильного виробництва [11].

Шлак є неминучим побічним продуктом виробництва сталі. Щорічно понад 400 мільйонів тон залізних і сталеливарних шлаків утворюються під час плавлення в результаті додавання шлакоутворювачів (таких як вапняк або доломіт) в доменну або сталеплавильну піч для видалення домішок із залізної руди, сталевих брухтів та інших матеріалів [12]. Відпрацьований шлак займає величезні площі землі та викликає багато серйозних екологічних проблем. Саме тому так багато уваги приділяється використанню шлаку як потенційної вторинної сировини. Основною проблемою використання шлаку є те, що кожен вид має свій хімічний склад і характеристики, що потребує попередніх досліджень щодо можливості його використання в тій чи іншій галузі.

Тому метою даного дослідження є можливість використання доменного гранульованого шлаку заводу «Камет-Сталь» для одержання будівельних матеріалів дорожнього призначення.

Методика експерименту

При розробці шлаколузних в'язучих вико-

ристовувались наступні сировинні матеріали: гранульований шлак заводу «Камет-Сталь» (м. Кам'янське); портландцемент ПЦ 1-500Р-Н (СЕМ 1 42,5 R) ПрАТ «Івано-ФранківськЦемент»; глина шамотна марки ПГОСА ТОВ «СтарДейл». Як лужні затворювачі використовували натрієве рідке скло з модулями 2,3–2,9 густиною 1300 кг/м³; 14% розчин соди каустичної; 18% розчин соди кальцинованої. Розчини готували з використанням води питної з джерел централізованого водопостачання за ДСТУ 7525:2014.

Доменний гранульований доменний шлак заводу «Камет-Сталь» поставляється підприємством споживачам у меленому вигляді. Визначена за допомогою методу повітропроникності площа питомої поверхні меленого шлаку складає 510 м²/кг та характеризується залишком на ситі №008 у кількості 6–8 мас.%. Оскільки вказана тонкість помелу у півтора рази перевищує площу питомої поверхні для цементу, то одержаний шлак може бути використаний без додаткового помелу.

Рідке скло використовувалось у товарному вигляді, додатково контролювалася лише густина, контроль здійснювався за допомогою набору ареометрів. Розчини лугів, та рідкого скла, для приготування зразків в'язучих, готувались заздалегідь.

Основою для одержання шлаколузних в'язучих є доменний гранульований молотий шлак заводу «Камет-Сталь», який відповідає ДСТУ Б В.2.7-302:2014 «Шлак доменний гранульований для цементів, бетонів і будівельних розчинів». Хімічний склад шлаку, мас. %: SiO₂ 38,18; Al₂O₃ 7,95; Fe₂O₃ 2,51; CaO 47,87; MgO 3,19; MnO 0,3. За коефіцієнтом якості, який для даного шлаку складає 1,55, його віднесено до відходів I гатунку, тому він може використовуватись для створення будівельних матеріалів без додаткового оброблення. Модуль основності даного шлаку складає 1,1, модуль активності – 0,21, тобто, шлак відносяться до основних і може бути активізований за лужним методом активації.

Рентгенограма шлаку наведена рис. 1. Встановлено, що значна частина шлаку знаходиться у рентгеноаморфному (склоподібному) стані. Це пояснюється тим, що при грануляції рідкий сплав шлаку не встигає закристалізуватися і твердне у скло.

На рентгенограмі також присутні піки, що відповідають фазам, характерним для доменних гранульованих шлаків: ранкініт, бредігіт, аліт, мервініт. Ці сполуки при затворенні водою мають слабкі в'язучі властивості, тому використо-

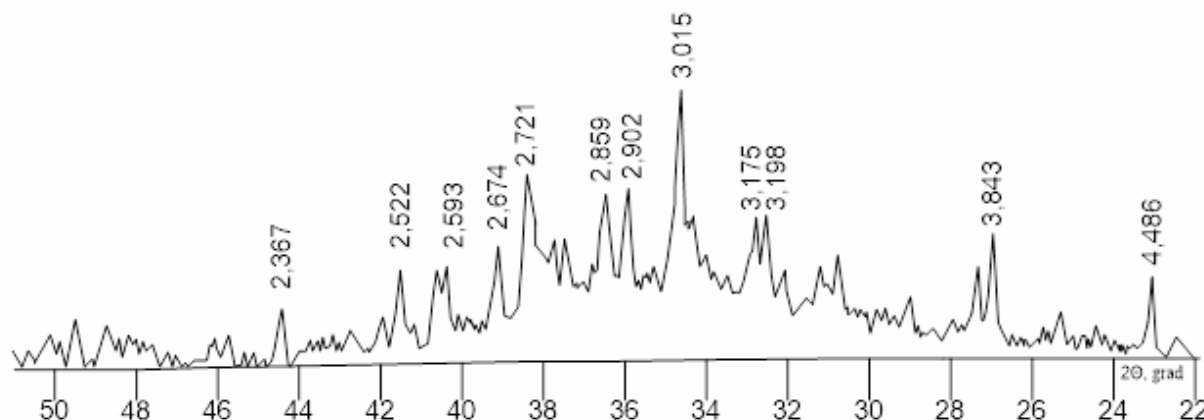


Рис. 1. Рентгенограма доменного гранульованого шлаку заводу «Камет-Сталь»

вуються активізатори тверднення.

Портландцемент вводився до складу матеріалу як компонент, що пробуджує тверднення шлаку за комплексною активізацією. Глина вводилась до складу матеріалу для зв'язування новоутворених алюмосилікатів лужних металів та знищення висолів, а також для покращення таких показників якості кінцевих виробів, як морозостійкість та водопоглинання.

Підготовка сировинних матеріалів та змішування шлаколужного в'язучого проводилось у металічному кульовому млині впродовж 20 хв для гомогенізації в'язучого. Одержану суміш затворювали лужними розчинами. Затворену суміш укладали у металеві форми – куби розміром 50×50×50 мм. Зразки зберігали у формах упродовж 1 доби у провітряно-вологих умовах. Через 1 добу форми розбирали і зразки зберігали впродовж 28 діб в аналогічних умовах. Через 2 та 28 діб визначили міцність одержаних зразків.

Результати та обговорення

Кількісний склад розроблених композицій шлаколужних в'язучих матеріалів наведений у табл. 1.

Метою експериментів було визначення найбільш ефективного способу активації для одержання в'язучого, вплив добавок на властивості зразків, можливість поєднання активуючих добавок для отримання стабільних властивостей в'язучого.

Необхідно відзначити підвищені показники міцності при активації чистого шлаку розчинами рідкого скла (табл. 1, склад ШД). Спостерігалися наступні залежності міцності зразків від показників затворювача: зростання міцності зі зменшенням модуля рідкого скла. У цілому, можливим є використання рідкого скла із широкими межами значень модуля, але це відбивається на термінах тужавіння набору та кінцевій міцності зразків.

Таблиця 1

Кількісний склад та фізико-механічні властивості зразків розроблених складів шлаколужних в'язучих матеріалів

№	Склад шлаколужного в'язучого, мас.%			Затворювач	Добавка до затворювача	Затв./тв. речовина	σ _{ст} , МПа, у віці	
	шлак	ПЦ	глина				2 доби	28 діб
ШД	100	–	–	Na ₂ SiO ₃ , M=2.3	–	0,27	21,9	52,5
1Д	91	3	6	NaOH	–	0,32	2,4	20,4
2Д	91	3	6	Na ₂ CO ₃	–	0,27	22,7	35,9
3Д	91	3	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.9	–	0,42	5,5	18,8
4Д	91	3	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.9	Ca(NO ₃) ₂	0,3	21,5	42,9
5Д	91	3	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.9	Цукор	0,34	20,0	42,6
6Д	91	3	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.3	–	0,35	17,2	42,9
7Д	91	3	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.3	Цукор	0,27	22,9	47,1
8Д	91	3	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.3	СДБ	0,28	21,9	46,1
9Д	91	–	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.3	–	0,26	23,9	51,9
10Д	91	–	6	Na ₂ SiO ₃ , M=2.3	Na ₂ SiF ₆	0,25	24,3	36,3

При введенні до складу композиції портландцементу спостерігається швидке тужавіння зразків термінами від 5 до 15 хвилин, що не відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-238:2010 «Будівельні матеріали. Плити бетонні тротуарні. Технічні умови». Для уповільнення термінів тужавіння використовувалися наступні добавки: цукор 0,1%; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0,017%; СДБ 0,1%; Na_2SiF_6 4%. Добавки вводили у кількостях, стандартних для зміни термінів тужавіння портландцементу.

Введення добавок чинить на композиції пластифікуючу дію, але несуттєво впливає на терміни тужавіння, початок тужавіння у цілому збільшився на 5–7 хвилин. Оскільки регулювати терміни тужавіння за допомогою тонкості помелу шлаку неможливо, тому найдоцільніше регулювати даний параметр зміною кількості цементу у складі композиції. Наявність портландцементу у складі зразків, які були затворені розчином рідкого скла, впливала на них збільшенням міцності, але скороченням термінів тужавіння. За присутності цементу у кількості більше 5 мас.% спостерігалось миттєве тужавіння. Достатня кількість цементу для відповідних показників міцності і нормованих термінів тужавіння складає 3 мас.%.

На уповільнення тужавіння позитивно впливає глина, при додаванні якої маса є більш пластичною. Глина при затворенні композиції адсорбує деяку кількість затворювача, не даючи йому миттєво реагувати зі шлаком та цементом. Але, суттєво, до 10–15 мас.%, збільшення кількості глини в складі зразків негативно впливає на кінцеву міцність. Через це оптимальною кількістю глини у складі композиції обрано 6 мас.%. Така кількість позитивно впливає на міцність шляхом додаткового утворення гідралюмосилікатів, та допомагає не втрачати зарано рухливість розчину.

Виключення зі складу глини або портландцементу призводить до суттєвого зниження міцності одержаних виробів.

Зразки, що були затворені розчинами кальцинованої та каустичної соди, виявили значно нижчу міцність, ніж зразки з рідким склом. Окрім того, значним недоліком слід вважати сильні висоли у всіх зразків. Не змогли зарадити в їх подоланні глина та додатково введений мікрокремнезем, тому використовувати такі в'язучі для виготовлення будівельних виробів не доцільно. В окремих випадках, для одержання спеціальних властивостей та при неможливості використання рідкого скла можливе застосування даного способу активації. Є дані [13] щодо вогне-

стійких властивостей таких в'язучих. Вони не тільки не втрачають міцності при нагріванні їх до високих температур, але й нарощують її.

Якщо порівнювати зразки, що затворені розчинами рідкого скла з різними модулями (рис. 2), можна зробити наступний висновок: зменшення модуля рідкого скла позитивно впливає як на початкову, так і на кінцеву міцність зразків, що не суперечить даним, отриманим іншими авторами [14].

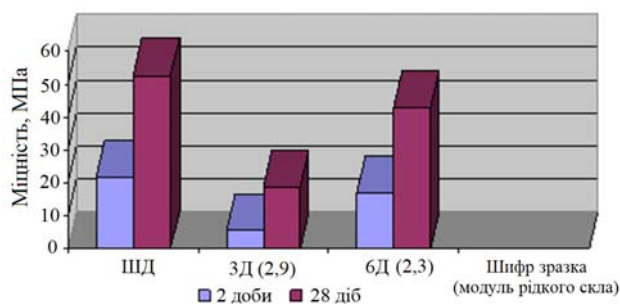


Рис. 2. Діаграма порівняння міцності зразків з використанням рідкого скла з різними модулями

Для визначення складу продуктів затворення розроблених матеріалів виконано рентгенографічний аналіз зразка 6Д у віці тверднення 2 та 28 діб. На рентгенограмах, наведених на рис. 3 та 4, чітко фіксується поступове розширення піків гідралічно неактивних сполук, присутніх у вихідному шлаці.

Піки, що відносяться до силікатів кальцію, відсутні на рентгенограмах зразка вже на 2 добу тверднення, що вказує на прискорений характер їх гідратації за додаткової присутності портландцементу та глини. На рентгенограмі зразка у віці 28 діб піки значно ширші, ніж у віці 2 діб, з чого можна зробити висновок, що міцний синтетичний камінь, отриманий з в'язучого, не втрачає рентгеноаморфної фази. Це буде зумовлювати подальший приріст зміцнення бетону в продовж часу його використання завдяки поступовому викристалізуванню сполук, що надають міцність виробу.

Твердіння шлаколуужних композицій обумовлено гідратацією шлакового скла під впливом гідроксильних іонів з утворенням низькоосновних гідросилікатів кальцію групи CSH (В), а також гідрогранатів та гідралюмосилікатів натрію. Цей процес проходить повільно, а після завершення гідратування, процеси продовжують проходити в твердофазних реакціях. Цим пояснюються здобуття міцності шлаколуужними цементами у довготривалі терміни.

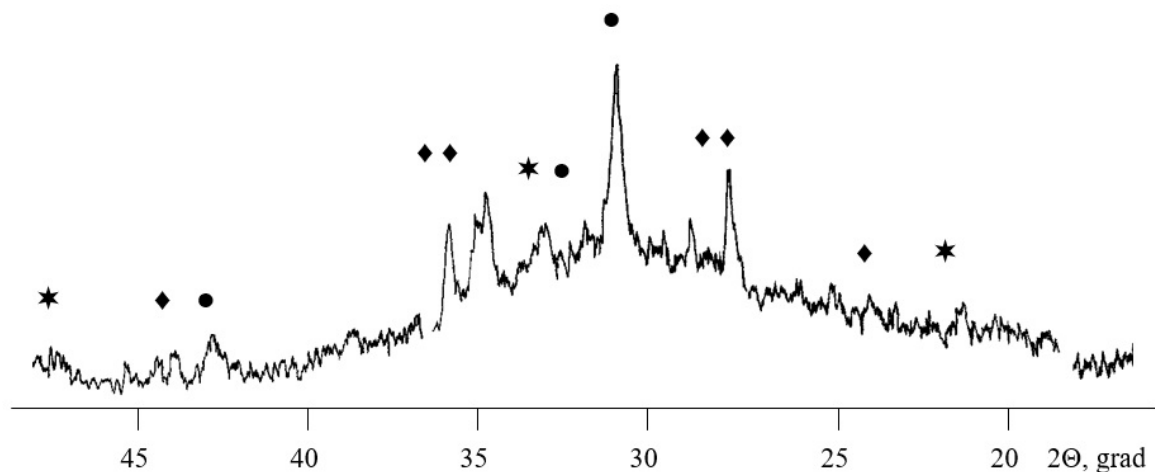


Рис. 3. Штрих-рентгенограма шлаколужного в'язучого матеріалу, затвореного рідким склом у віці 2 доби:
◆ – дісилікат натрію, ● – окерманіт, * – геленіт

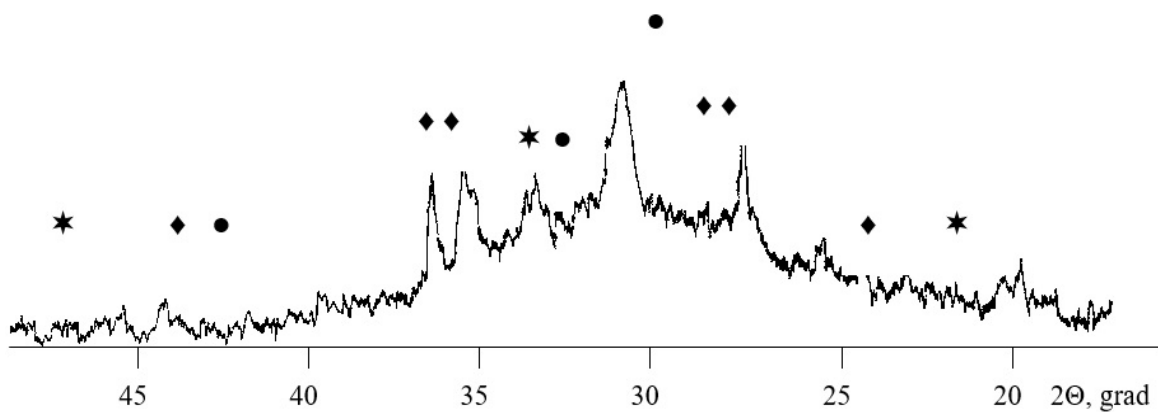


Рис. 4. Штрих-рентгенограма шлаколужного в'язучого матеріалу, затвореного рідким склом у віці 28 діб:
◆ – дісилікат натрію, ● – окерманіт, * – геленіт

Визначення основних фізико-механічних та технічних властивостей одержаних шлаколужних бетонів відбувалося згідно ДСТУ Б В.2.7-238:2010 «Будівельні матеріали. Плити бетонні тротуарні. Технічні умови». До основних фізико-механічних та технічних властивостей розроблених шлаколужних бетонів відноситься: міцність при стиску, морозостійкість, стійкість до стирання, водопоглинання.

Для визначення цих показників були виготовлені наступні зразки: для визначення міцності при стиску, водопоглинання та морозостійкості – куби з розміром ребра 50 мм методом віброущільнення; для визначення стійкості до стирання – плитки розміром (160×40×40) мм методом віброущільнення з поступовим укладанням шарів матеріалу (шар товщиною 10 см з віброущільненням впродовж 30 секунд, потім шар товщиною 30 см з віброущільненням до загального часу

2 хвилини).

Склад зразків був наступним: 25 мас.% шлаколужного в'язучого матеріалу оптимального складу, 75 мас.% гранітного відсіву (60 мас.% фракції $(2-1,25) \cdot 10^{-3}$ м та 40 мас.% фракції $(1,25-0,63) \cdot 10^{-3}$ м).

Усі зразки після формування витримували впродовж 24 годин у повітряно-вологих умовах, а потім 28 діб у аналогічних умовах. Після цього зразки піддавали випробуванням. Результати визначення основних фізико-механічних і технічних властивостей зразків шлаколужних бетонів наведені у табл. 2.

Таким чином, за даними ДСТУ розроблений шлаколужний бетон має марку за міцністю при стиску В 150. При кліматичному виконанні УХЛ4 за ДСТУ EN 60529:2018 при розрахунковій температурі зовнішнього повітря найбільш холодної п'ятиденки району будівництва 5–15°C марка бе-

тону за морозостійкістю становить F 150. Водопоглинання бетону та стійкість до стирання відповідає вимогам ДСТУ.

За результатами випробувань та ґрунтуючись на вимогах державних стандартів, можна зробити висновок, що одержані бетони на шлаколузних в'язучих матеріалах можуть бути використані для створення покриттів садово-паркових і садових доріжок, тротуарів у внутрішньо-квартирних проїздах.

Таблиця 2

Основні фізико-механічні та технічні властивості зразків шлаколузних бетонів

Властивість	Значення
Міцність при стиску, кг/см ² , у віці:	
1 доба	97
3 доби	115
7 діб	142
28 діб	170
Водопоглинання, %	4,2
Морозостійкість, цикли	більше 25 (без зміни міцності)
Стійкість до стирання, г/см ²	0,8

Оскільки затворення таких виробів відбувається за допомогою рідкого скла, то такі виробу стійкі до дії більшості мінеральних та органічних кислот, крім фтористоводневої, кремнефтористоводневої кислот і лугів.

На основі розробленого шлаколузного в'язучого матеріалу оптимального складу було одержано зразки готових виробів – тротуарні плитки. Як заповнювачі використовували пісок та гранітний відсів. Склад плитки наступний: 43% шлаколузного в'язучого оптимального складу, 36% гранітного відсіву та 21% піску. Вихідні матеріали змішувались у кульовому металічному млині впродовж 20 хв, для гомогенізації суміші. Суміш затворювалась рідким склом, плитка виготовлялась у металічній формі розміром (200×160×70)·10⁻³ м методом віброущільнення. Форми розбирались через 4 години після виготовлення виробів і висушувались при температурі 60°C впродовж 10 годин.

Одержані плитки мали міцність на стиск 200 кг/см², морозостійкість у режимі змінного заморожування при температурі –20°C та відтаювання більше ніж 25 циклів. Таким чином, готові виробу у вигляді тротуарної плитки на основі розробленого шлаколузного в'язучого матеріалу оптимального складу має марку 200, є

морозостійкими та відповідають державному стандарту України на такі виробу.

Висновки

Таким чином, досліджено хімічний і фазовий склад гранульованого доменного шлаку заводу «Камет-Сталь» та визначено що він може використовуватися як вихідний матеріал при виробництві шлаколузного в'язучого. Розроблено склад шлаколузного в'язучого матеріалу на основі дослідженого доменного шлаку, та обрано оптимальну вихідну суміш, яка складається з 91 мас.% доменного гранульованого шлаку, 6 мас.% глини та 3 мас.% портландцементу, затворених рідким склом з модулем 2,3 і густиною 1300 кг/м³. Визначено основні фізико-механічні та технічні властивості розробленого шлаколузного в'язучого матеріалу та встановлено, що оптимальний склад має підвищену міцність у початкові терміни тужавіння та продовжує нарощувати її за рахунок перекристалізації новоутворень і ренгеноаморфної шлакової склофази. Одержані шлаколузні в'язучі матеріали є високоміцними та можуть бути використані для одержання найпоширенішого будівельного матеріалу цивільного будівництва – тротуарної плитки.

Подяка

Дослідження здійснювалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту 111/0316 «Розроблення складів композиційних матеріалів для дорожнього будівництва на основі багатотоннажних відходів».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Belaid F.* How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? // *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* – 2022. – Vol.15. – Art. No. 200084.
2. *Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes* / Bernal S.A., de Gutierrez R.M., Pedraza A.L., Provis J.L., Rodriguez E.D., Delvasto S. // *Cem. Concr. Res.* – 2011. – Vol.41. – No. 1. – P.1-8.
3. *Properties of slag-alkali binders based on industrial waste* / Isakulov B.R., Jumabayev M.D., Abdullaev H.T., Akishev U.K., Aymaganbetov M.N. // *Periodico Tche Quimica (Online)*. – 2019. – Vol.16. – No. 32. – P.375-387.
4. *Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J., Jalali S.* Alkali-activated binders: a review. Part 2. About materials and binders manufacture // *Constr. Build. Mater.* – 2008. – Vol.22. – P.1315-1322.

5. Study of an ecological cement-based composite with a sustainable raw material, sunflower stalk ash / Serbanoiu A.A., Gradinaru C.M., Cimpoesu N., Filipeanu D., Serbanoiu B.V., Chereches N.C. // *Materials*. – 2021. – Vol.14. – No. 23. – Art. No. 7177.

6. *Perspectives* on environmental CO₂ emission and energy factor in cement industry / Fayomi G.U., Mini S.E., Fayomi O.S.I., Ayoola A.A. // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* – 2019. – Vol.331. – Art. No. 012035.

7. Zieri W., Ismail I. Alternative fuels from waste products in cement industry // *Handbook of ecomaterials*. – 2019. – P.1183-1206.

8. Siddique R., Cachim P. Waste and supplementary cementitious materials in concrete: characterisation, properties and applications. – Sawston, UK: Woodhead Publishing, 2018. – 640 p.

9. *Agricultural* solid waste as source of supplementary cementitious materials in developing countries / Chandra P.S., Mbewe P.B., Kong S.Y., Savija B. // *Materials*. – 2019. – Vol.12. – No. 7. – Art. No. 1112.

10. Singh J., Singh J. Sustainable use of industrial waste in cement industry // *Int. J. Environ. Ecol. Family Urban Stud. (IJEEFUS)*. – 2016. – Vol.6. – No. 3. – P.45-54.

11. Singh V.K. The science and technology of cement and other hydraulic binders. – Woodhead Publishing, 2023. – 920 p.

12. *The recycling* effect of BOF slag in the portland cement properties / Carvalho S.Z., Vernilli F., Almeida B., Demarco M., Silva S.N. // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2017. – Vol.127. – P.216-220.

13. Panias D., Balomenos E., Sakkas K. The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders // *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. – 2015. – P.423-461.

14. *Control* of structure formation processes of slag-alkali cements activated with sodium silicates / Krivenko P., Gelevera O., Rudenko I., Konstantynovskiy O. // *Modern Constr. Architect.* – 2023. – P.56-70.

Надійшла до редакції 07.06.2023

DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS OF SLAG-ALKALINE BINDING MATERIALS FOR PAVEMENT PRODUCTS

G.M. Shabanova, A.M. Korogodska, V.M. Shumeiko, O.M. Borysenko, G.V. Lisachuk, R.V. Krivobok *, M.D. Sakhnenko

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

* e-mail: krivobok491@gmail.com

In this work, blast furnace granulated slag of the Kamet-Stal plant was investigated. It was established that the slag belongs to the basic ones. According to the quality factor, the slag belongs to grade 1 and can be used to fabricate slag-alkaline binding material by the alkaline method of activation. A significant part of the slag is in an X-ray amorphous state, which contributes to the production of strong cement stone in the late stages of hardening. The crystalline phases of the slag exhibit weak binding properties and provide strength to the hardened slag-alkaline binding material. To activate the slag and plasticize the composition, portland cement and clay were introduced into it, sodium liquid glass, caustic soda solution and soda ash solution being used as an alkaline sealer. The exclusion of clay from the basic composition leads to an increase in strength almost twice due to additional activation of slag with portland cement. A significant drawback in this case is the numerous precipitates that appear on the samples already on the first day of hardening. Thus, for accelerated curing times, increased mechanical strength, reduction in the amount of leaching and a significant reduction in the cost of finished products, we suggested the composition containing 91 wt.% slag; 6 wt.% clay; and 3 wt.% portland cement closed with a solution of liquid glass with a modulus of 2.3 and a density of 1300 kg/m³.

Keywords: slag-alkaline binder; paving slab; alkaline shutter; liquid glass; strength; hardening terms.

REFERENCES

1. Belaid F. How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resour Conserv Recycl Adv.* 2022; 15: 200084. doi: 10.1016/j.rcradv.2022.200084.

2. Bernal SA, de Gutierrez RM, Pedraza AL, Provis JL, Rodriguez ED, Delvasto S. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cem Concr Res.* 2011; 41: 1-8. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.08.017.

3. Isakulov BR, Jumabayev MD, Abdullaev HT, Akishev UK, Aymaganbetov MN. Properties of slag-alkali binders based on industrial waste. *Periodico Tche Quimica (Online)*. 2019; 16(32): 375-387.

4. Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S. Alkali-activated binders: a review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Constr Build Mater.* 2008; 22: 1315-1322. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019.

5. Serbanoiu AA, Gradinaru CM, Cimpoesu N, Filipeanu D, Serbanoiu BV, Chereches NC. Study of an ecological cement-based composite with a sustainable raw material, sunflower stalk ash. *Materials*. 2021; 14(23): 7177. doi: 10.3390/ma14237177.

6. Fayomi GU, Mini SE, Fayomi OSI, Ayoola AA. Perspectives on environmental CO₂ emission and energy factor in cement industry. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2019; 331: 012035. doi: 10.1088/1755-1315/331/1/012035.
7. Zieri W, Ismail I. Alternative fuels from waste products in cement industry. In: Martinez L, Kharissova O, Kharisov B, editors. *Handbook of ecomaterials*. Cham: Springer; 2019. p. 1183-1206. doi: 10.1007/978-3-319-68255-6_142.
8. Siddique R, Cachim P. *Waste and supplementary cementitious Materials in concrete: characterisation, properties and applications*. Sawston, UK: Woodhead Publishing; 2018. 640 p.
9. Chandra PS, Mbewe PBK, Kong SY, Savija B. Agricultural solid waste as source of supplementary cementitious materials in developing countries. *Materials*. 2019; 12: 1112. doi: 10.3390/ma12071112.
10. Sing J, Singh J. Sustainable use of industrial waste in cement industry. *Int J Environ Ecol Family Urban Studies (IJEEFUS)*. 2016; 6(3): 45-54.
11. Singh VK. *The science and technology of cement and other hydraulic binders*. Woodhead Publishing; 2023. 920 p. doi: 10.1016/C2021-0-02247-1.
12. Carvalho SZ, Vernilli F, Almeida B, Demarco M, Silva SN. The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. *Resour Conserv Recycl*. 2017; 127: 216-220. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.021.
13. Pnias D, Balomenos E, Sakkas K. 16 - The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders. In: *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Woodhead Publishing; 2015. p. 423-461. doi: 10.1533/9781782422884.3.423.
14. Krivenko P, Gelevera O, Rudenko I, Konstantynovskyi O. Upravlinnya protsessamy strukturoutvorenniya shlakoluzhnykh tsementiv, aktyvovanykh sylikatamy natriyu [Control of structure formation processes of slag-alkali cements activated with sodium silicates]. *Modern Constr Architect*. 2023; (4): 56-70. (in Ukrainian). doi: 10.31650/2786-6696-2023-4-56-70.