

УДК 666.943.3

*Г.М. Шабанова, А.М. Корогодська, В.М. Шумейко, Л.П. Щукіна, Г.В. Лісачук,
Р.В. Кривобок, М.Д. Сахненко*

ВПЛИВ АКТИВАТОРІВ ТВЕРДНЕННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ШЛАКОЛУЖНИХ В'ЯЖУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

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

У статті охарактеризовано процеси одержання раціональних складів шлаколужних в'язучих матеріалів з використанням доменного гранульованого шлаку ПАТ «Запоріжсталь», які за своїми фізико-механічними властивостями можуть бути запропоновані як основа та поверхневий шар для виготовлення високоміцної зносостійкої тротуарної плитки, яка буде відповідати вимогам ДСТУ. Залучення до виробництва тротуарної плитки різних груп промислових відходів дозволить розширити сировинну базу вітчизняних підприємств, в 2–4 рази знизити собівартість продукції без зниження її якості і зменшити до 80% витрати первинних сировинних ресурсів. Завдяки даним розробкам підприємства-генератори відходів, а також утримувачі полігонів зможуть знизити об'єми накопичених відходів і витрати, пов'язані з природоохоронними заходами, що дозволить мінімізувати негативний вплив накопичених відходів на навколишнє середовище і здоров'я людей.

Ключові слова: шлаколужні в'язучі, бетон, лужні затворювачі, міцність, морозостійкість, водопоглинання, стійкість до стирання.

DOI: 10.32434/0321-4095-2023-150-5-155-162

Вступ

У 1992 році на Конференції ООН з навколишнього середовища та розвитку, відомій як «Саміт Землі», була сформульована концепція екоєфективності будь-яких виробництв, а «World Business Council for Sustainable Development» визначив наступні дії для її досягнення: зниження матеріаломісткості виробів; зниження енергоємності продуктів; зменшення токсичних викидів; підвищення можливості перероблення матеріалів; максимально раціональне використання відновлюваних ресурсів; збільшення терміну служби виробів.

Для цементної промисловості, яка є однією з найбільш матеріало- та енергоємних галузей, ці компоненти можна надати в наступних рекомендаціях [1]:

- впровадження низькотемпературних технологій виробництва клінкеру;
- виробництво більш міцного цементу та у подальшому застосування більш міцного бетону

в конструкціях;

- виробництво більш міцних матеріалів на основі цементу зі значно збільшеним терміном слугування, що в свою чергу знизить їх вартість обслуговування;
- застосування мінеральних добавок або промислових побічних продуктів під час виробництва цементів;
- впровадження сучасних технологій енергозбереження;
- розробка та застосування нових видів цементу на основі альтернативних в'язучих речовин.

Одним з найперспективніших напрямів розвитку виробництва найпоширенішого будівельного зв'язуючого матеріалу – портландцементу, є використання ресурсощадних технологій [2].

В Україні на 2019 рік зібралося понад 2 млрд. тон шлаків, під складування яких зайняті площі понад 16 тис. га, а наповненість існуючих сховищ обумовлює необхідність постійного відве-

© Г.М. Шабанова, А.М. Корогодська, В.М. Шумейко, Л.П. Щукіна, 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/>).

The effect of hardening activators on the physical and mechanical properties of slag-alkaline binding materials

дення нових територій [3].

В Україні шлаки використовують в будівельній галузі для виробництва цементу, бетону, цегли, теплоізоляційних сумішей, шлакоблоків, газобетону, абразивів, пінобетонів, руберойду, сухих будівельних сумішей, тротуарної плитки та шиферу. Також українські шлаки експортують до Італії, Ізраїлю та Грузії [3]. Наприклад, у 2018 році Україна посіла 25-те місце з експорту шлаків у світі [4].

В Україні є всі резерви для того щоб перейти на перспективне перероблення доменних шлаків як з економічного, так і з екологічного погляду [5].

В останні роки дослідження лужноактивованих матеріалів на основі в'язучих матеріалів, а саме доменних шлаків, стали популярною темою в академічних колах [6–8]. Авторами [9,10] доведено, що доменні шлаки стають високоактивними з лужним активатором, що створює умови для набору міцності. Більш того механічні властивості, термостійкість та корозійна стійкість одержаних матеріалів краща ніж звичайних матеріалів на основі портландцементу [11,12].

Методика експерименту. Характеристика вихідних сировинних матеріалів

При розробці шлаколужних в'язучих матеріалів використовувались наступні сировинні матеріали: гранульований шлак ПАТ «Запоріжсталь»; 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 з густиною 1300 кг/м³; 14%-ний розчин соди каустичної; 18% розчин соди кальцинованої. Розчини готували з використанням води питної з джерел централізованого водопостачання за ДСТУ 7525:2014.

Доменний гранульований шлак ПАТ «Запоріжсталь» був одержаний у вигляді гранул, роз-

міром від 0,5 до 10 мм. Для здійснення досліджень шлак був висушений і розмелений до площі питомої поверхні, яка відповідає тонкості портландцементу.

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

Основою для одержання та дослідження шлаколужних в'язучих матеріалів є доменний гранульований мелений шлак ПАТ «Запоріжсталь», який відповідає ДСТУ Б В.2.7-302:2014 «Шлак доменний гранульований для цементів, бетонів і будівельних розчинів». Хімічний склад шлаку (мас.%): SiO₂ 38,98; CaO 48,68; Al₂O₃ 7,14; FeO 0,16; MgO 4,07; S 0,97. За коефіцієнтом якості, який для даного шлаку складає 1,54, його віднесено до відходів 1 сорту, тому він може використовуватись для створення будівельних матеріалів без додаткового оброблення. Модуль основності даного шлаку складає 1,14, модуль активності – 0,18, тобто, шлак відноситься до основних і може бути активізований за лужним методом активації.

Для встановлення фазового складу був проведений рентгенофазовий аналіз гранульованого шлаку. Рентгенограма шлаку наведена рис. 1.

За результатами виконаного аналізу встановлено, що основу шлаку складає склоподібна фаза. Це пояснюється тим, що комплексні аніони [SiO₃]²⁻, [Si₃O₅]²⁻, [AlO₄]⁵⁻ взаємодіють у розплавленому шлаку з іонами-модифікаторами (катіонами кальцію, магнію, заліза) і один з одним, утворюючи складні комплексні ланцюги типу [–Me–O–Si–] різної довжини. При швидкому охолодженні розплаву комплексні іони не встигають розщепитися й утворити більш прості й рухливі угруповання іонів, які легко могли б дифундувати в розплаві й слугувати структурними еле-

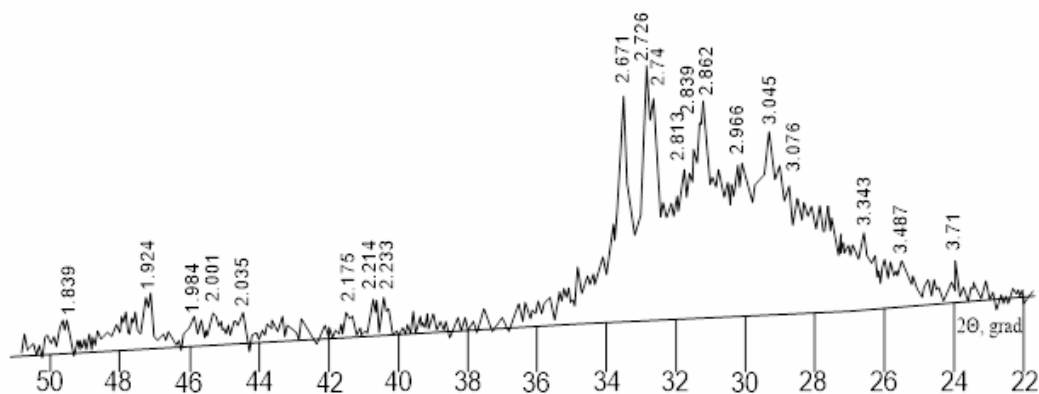


Рис. 1. Рентгенограма доменного гранульованого шлаку ПАТ «Запоріжсталь»

ментами виникаючих зародків кристалів. У результаті рідкі шлаки при їх швидкому охолодженні переохолоджуються й тверднуть у скло [13]. Структура шлакового скла аналогічна структурі звичайного скла і являє собою тривимірну сітку, утворену комплексними іонами та іонами-модифікаторами. Разом з тим, у шлаковому склі спостерігаються і кристаліти – угруповання іонів з координацією й щільністю, що наближаються до відповідних показників у кристалічних тіл.

Основними кристалічними компонентами досліджуваного шлаку є тверді розчини геленіту та окерманіту (меліліти), ранкінит, мервініт. Склоподібна фаза при звичайних температурах є нестійкою й під впливом зовнішніх факторів (води) прагне перейти в стабільну кристалічну фазу. Висока внутрішня хімічна енергія скла забезпечує йому підвищену розчинність, результатом чого є утворення метастабільних пересичених розчинів й їх кристалізація. Кристалогідрати, що утворюються, викликають повільне твердіння гранульованих шлаків. Для підвищення гідралічної активності шлаків використовуються активізатори тверднення.

Прискорення гідратації склоподібних шлаків у присутності надлишкової кількості іонів Ca^{2+} (лужна активація шлаків) обумовлюється взаємодією кальцію з іонами алюмінію й кремнію, розташованими в поверхневих шарах окремих часточок матеріалу. Алюмінати і силікати кальцію, що утворюються, деформують (розкривають) решітку шлаків і підвищують його активність. Якщо врахувати підвищену розчинність склоподібної фази, то присутність вільного

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ сприяє інтенсивному утворенню гідралюмінатів і гідросилікатів кальцію й у розчині. Оскільки при твердненні портландцементу виділяється значна кількість кальцію гідроксиду, то саме його використовували для комплексної активації шлаку. Глина вводилась до складу матеріалу для зв'язування новоутворених алюмосилікатів лужних металів та знищення висолів, а також для покращення таких показників якості кінечних виробів як морозостійкість, водопоглинання.

Як вже було зазначено, використовуваний шлак був домелений. Відомо [14], що питома поверхня шлаку для одержання шлаколужних в'язучих повинна бути не менш $400 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для цього помел необхідно проводити до проходу шлаку крізь сито № 008 не менш 75%. При цьому питома поверхня шлаку, виміряна методом повітропроникності становить $875 \text{ м}^2/\text{кг}$. Під час здійснення дослідів використовувався шлак з тонкістю помелу від 300 до $900 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Шлак був заздалегідь висушений у сушильній шафі при температурі $105\text{--}110^\circ\text{C}$, а потім розмелений у металевому кульовому млині з металевими помельними тілами. При спробах помелу вологого шлаку спостерігалось «залипання» помельного барабана. При розвантажуванні матеріалу серед меленого шлаку знайдені недрібнені часточки, що собою не являють шлак, а, ймовірно, є закристалізованими включеннями твердих мінералів, які не піддаються помелу. Таку особливість слід мати на увазі при організації процесу в промислових масштабах та виборі методів виділення таких часток, в залежності від необхідності для конкретних виробів.

Таблиця 1

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

№	Склад шлаколужного в'язучого, мас. %			Затворювач	Затв./тв. речовина	$\sigma_{\text{ст}}$, МПа, у віці	
	шлак	глина	ПЦ			2 доби	28 діб
ША	100	–	–	Na_2SiO_3 , $M=2,45$	0,31	14,3	54,9
1А	94	6	–	Na_2SiO_3 , $M=2,45$	0,25	18,1	58,5
2А	91	6	3	Na_2SiO_3 , $M=2,45$	0,23	30,5	60,1
3А	91	6	3	NaOH	0,25	6,2	19,7
4А	94	–	6	NaOH	0,23	14,3	21,9
5А	87	10	3	NaOH	0,24	8,8	18,8
6А	82	15	3	NaOH	0,27	7,2	17,2
7А	85	10	5	NaOH	0,33	10,7	22,5
8А	91	6	3	Na_2CO_3	0,25	1,9	4,7
9А	94	–	6	Na_2CO_3	0,25	23,4	45,8
10А	94	–	6	Na_2SiO_3 , $M=2,45$	0,26	21,9	56,6
11А	91	6	3	Na_2CO_3 при помелі	0,3	21,9	34,7
12А	91	6	3	Na_2CO_3 +кремнієві відходи при помелі	0,31	21,9	34,6

Підготовка сировинних матеріалів і змішування шлаколужного в'язучого проводилось у металічному кульовому млині впродовж 20 хв, для гомогенізації в'язучого. Одержану суміш затворювали лужними розчинами, укладали у металеві форми – куби розміром 50×50×50 мм. Зразки зберігали у формах впродовж 1 доби у повітряно-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 та основні фізико-механічні властивості розроблених композицій шлаколужних в'язучих матеріалів наведені у табл. 1.

Найбільше впливає на міцність та на терміни тужавіння зразків тонкість помелу шлаку. При збільшенні тонкості помелу строки тужавіння різко зменшувались. При тонкості більше 1000 м²/кг зразки тужавили миттєво, ще до того як розчин в'язучого був поміщений у форми.

Рентгенограми зразків, затворених різними

активаторами, наведені на рис. 2 і 3.

За результатами здійснених рентгенівських досліджень встановлено, що у складі розроблених композицій, затворених різними лужними розчинами, присутні майже однакові фази: кварц, кальцит і солі натрію. Однак композиція складу 8А має у своєму складі фази, характерні для затверділого портландцементу: портландіт, тоберморіт і авфіліт. Тому при зміні кількісного складу композиція повинна проявляти більшу міцність, ніж одержана у результаті досліджень. Присутність у складі обох розроблених композицій солей натрію вказує на присутність значних висолів.

Виключення із базового складу глини (склади 4А та 9А) приводить до збільшення міцності майже у два рази за рахунок додаткової активізації шлаку портландцементом. Значним недоліком у цьому випадку є чисельні висоли, які з'являються на зразках вже на першу добу тверднення.

Для зменшення висолів було проварійовано співвідношення шлак:глина:портландцемент (склади 5А, 6А і 7А). Встановлено, що збільшен-

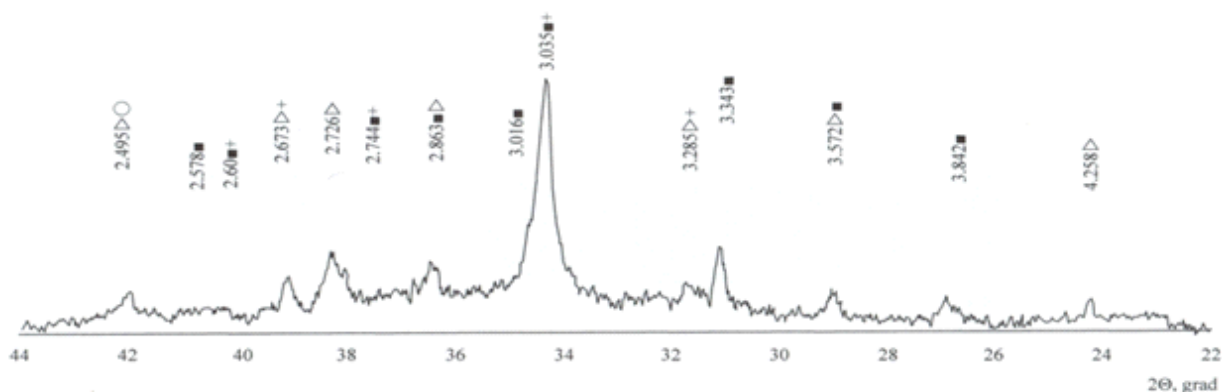


Рис. 2. Рентгенограма шлаку складу 3А у віці 28 діб тверднення: ○ – кварц; ■ – бредіт; + – солі натрію, △ – кальцит

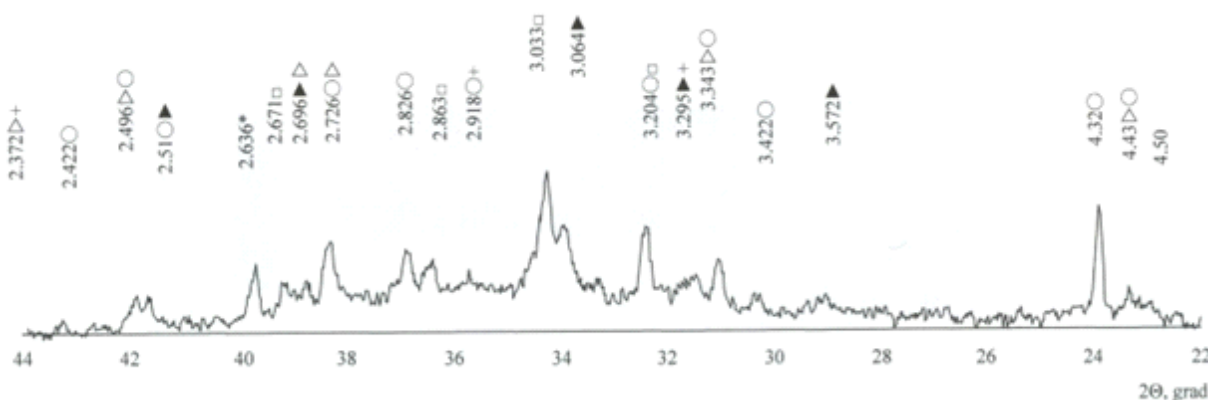


Рис. 3. Рентгенограма шлаку складу 8А у віці 28 діб тверднення: ○ – кварц; ● – портландіт; + – солі натрію, △ – кальцит, □ – авфіліт, ▲ – оберморіт

ня у складі зразків глини призводить до значного зменшення міцності в усі строки тверднення.

Для збільшення міцності, зменшення кількості висолів і спрощення операцій підготовки сировинної суміші було запропоновано вводити соду при помелі вихідної сировинної суміші з наступним затворенням її водою (склад 11А). Для цього складу відзначається поступове збільшення міцності, яке перевищує обраний базовий склад майже у три рази та призводить до зменшення висолів.

Для їх видалення у сировинну суміш при помелі вводили відходи виробництва кремневих помельних тіл, які містять у своєму складі до 95 мас.% SiO_2 в аморфному стані та за величиною питомої поверхні близьким до тонкомеленого шлаку (склад 12А). Для таких зразків відмічено прискорення строків тужавіння, збільшення міцності у всі строки тужавлення та зменшення кількості висолів.

Порівняно міцності зразків, які були затворені активовані різними речовинами (рис. 4).

Як вже було зазначено вище, найкращу міцність проявили зразки на розчині рідкого скла (склад 2А). Вже на першу добу їх міцність вияви-

лася досить високою – 18 МПа. Зразки на розчині кальцинованої соди не мали ознак тужавіння протягом значного проміжку часу. Міцність на рівні 2 МПа залишалась протягом семи діб без її нарощування. На 28 добу міцність досягла 4,5 МПа. Дещо більшою вона виявилася у зразків затворених каустичною содою, на 28 добу – майже 20 МПа. У всіх трьох зразків у складі були присутні портландцемент і глина. Остання не допомогла у вирішенні питання з висолами у зразків, затворених розчинами обох видів соди.

Отже, розглядаючи вплив різних компонентів на якість зразків шлаколужного в'язучого, можна відмітити стабільно високі показники міцності зразків, затворених розчином рідкого скла.

Для одержання шлаколужного бетону відповідної міцності, щільності та однорідності, що забезпечує необхідну експлуатаційну надійність виготовлених бетонів, було виконано підбір оптимального гранулометричного складу заповнювача, що значно впливає на вищезазначені параметри.

При проведенні експерименту як в'язуче використовувався шлаколушний матеріал оптимального складу, одержаний у попередніх дослід-

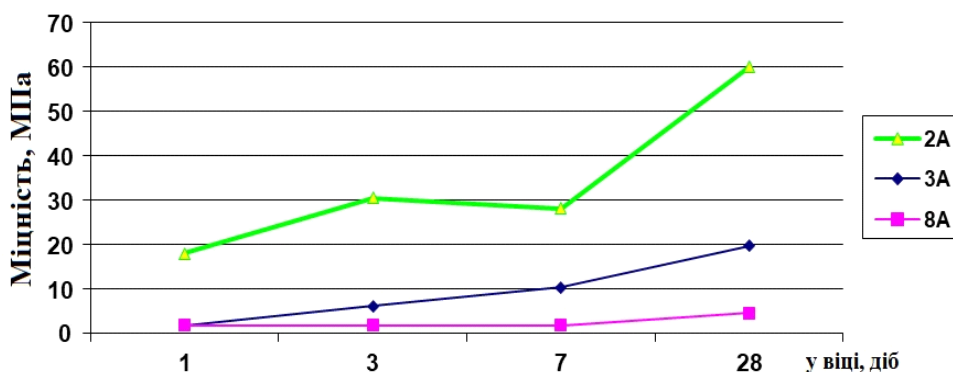


Рис. 4. Порівняння міцності зразків з використанням шлаку ПАТ «Запоріжсталь», активованого різними способами

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

Матриця планування експерименту для оптимізації міцності при стисканні				
Коефіцієнт полінома	Фракції наповнювача			Міцність при стисканні, МПа
	x_1 (2–1,25 мм)	x_2 (1,26–0,63 мм)	x_3 (<0,63 мм)	
n1	1	0	0	39,3
n2	0	1	0	17,0
n3	0	0	1	14,0
n12	0,5	0,5	0	29,4
n23	0,5	0	0,5	14,9
n13	0	0,5	0,5	26,6
n123	0,33	0,33	0,33	30,8
Контрольна точка	0,5	0,2	0,3	33,2

женнях, з найвищими експлуатаційними показниками. Як заповнювач використовувався гранітний відсів наступних фракцій: 2–1,25 мм, 1,25–0,63 мм та менше 0,63 мм. Зразки бетонів у вигляді кубів розміром 50×50×50 мм виготовлялись методом віброущільнення. Оптимізація кількісного співвідношення суміжних фракцій заповнювача проводилась за допомогою симплекс-гатчастого методу планування експерименту. Для опису залежності міцності одержаних бетонів від кількісного співвідношення суміжних фракцій заповнювачів використовували поліном неповного третього порядку [15]. Матрицю планування експерименту наведено у табл. 2.

Базуючись на основі виконаних розрахунків, було визначено коефіцієнти рівняння залежності міцності одержаних шлаколужних бетонів від кількісного та гранулометричного складу заповнювання; відповідне рівняння має наступний вигляд:

$$Y_{\sigma} = 39,3x_1 + 17,0x_2 + 14,0x_3 + 5,0x_{12} - 0,2x_{13} - 2,4x_{23} + 191,7x_{123}$$

Адекватність рівняння перевірялась постановкою додаткових контрольних експериментів. Для розрахунку поверхні оптимізації використовувалась спеціально розроблена програма в оболонці Microsoft Office Excel. За результатами виконаних розрахунків і математичної обробки да-

них побудована симплекс-діаграма «склад–межа міцності при стиску» та проєкцій ліній однакового рівня для міцності при стиску зразків (рис. 5).

Із результатів розрахунку видно, що для одержання високоміцних шлаколужних бетонів необхідно обирати суміш, яка складається з трьох фракцій з наступним кількісним співвідношенням розмірів зерен: фракція 2–1,25 мм 60–95 мас.%; фракція 1,25–0,63 мм 0–20 мас.%; фракція <0,63 мм 0–25 мас.%.

Наявність фракції середньої та дрібної фракції є обмеженою, оскільки її присутність значно знижує міцність одержаних виробів. Вміст тонкої фракції замінюється шлаколужним в'язучим, тому необхідну міцність одержаним зразкам шлаколужних бетонів (до 40 МПа) надає фактично двофракційна суміш заповнювача. Усі подальші дослідження фізико-технічних властивостей розроблених шлаколужних бетонів виконувалась з урахуванням оптимального гранулометричного складу заповнювача.

До основних фізико-механічних та технічних властивостей розроблених шлаколужних бетонів відносяться: 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 –

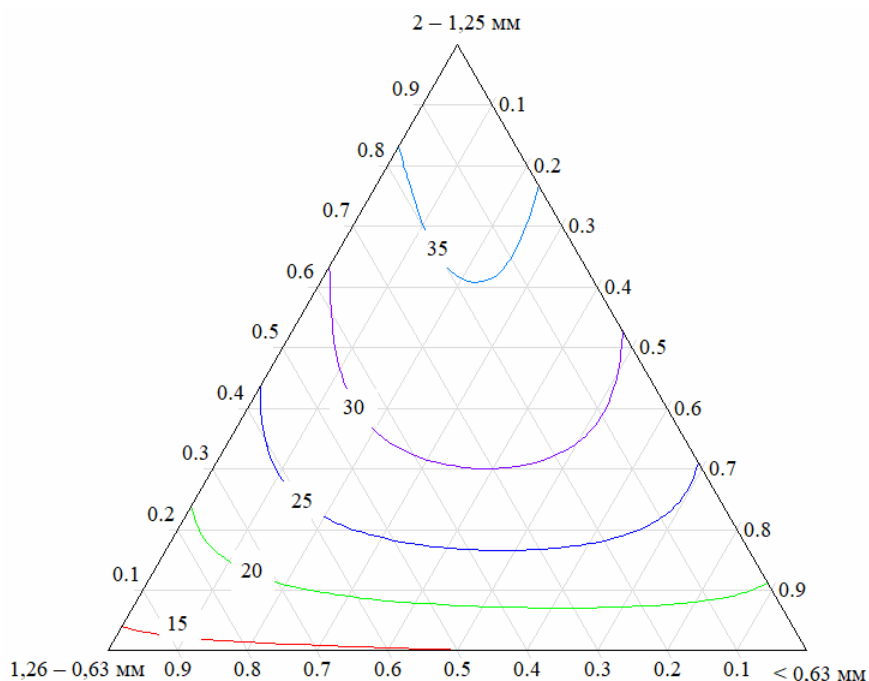


Рис. 5. Діаграма «склад–межа міцності при стиску» зразків шлаколужних бетонів, одержаних з використанням гранвідсіву

плитки розміром 160×40×40 мм методом віброушільнення з поступовим укладанням шарів матеріалу (шар товщиною 1 см з віброушільненням впродовж 30 секунд, потім шар товщиною 3 см з віброушільненням до загального часу 2 хвилини).

Співвідношення шлаколужного в'язучого матеріалу оптимального складу та гранвідсіву складало 1:3, затворення відбувалось розчином рідкого скла з модулем 2,45. Усі зразки після формування витримували впродовж 24 годин у повітряно-вологих умовах, після чого зразки виймали з форм та зберігали упродовж 28 діб в аналогічних умовах. Після цього зразки піддавали випробуванням.

Встановлено, що міцність при стисканні зразків у віці 28 діб складає 33,6–42 МПа, водопоглинання 4,0–4,2%, стійкість до стирання 0,8–1,0%, морозостійкість 23–25 змін заморожування–відтавання. Таким чином, фізико-механічні властивості отриманих бетонів зі шлаколужних в'язучих матеріалів відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-238:2010 «Плити бетонні тротуарні. Технічні умови».

Висновки

Таким чином, у результаті здійснених експериментальних досліджень одержані шлаколужні в'язучі матеріали раціональних складів з використанням доменного гранульованого шлаку ПАТ «Запоріжсталь», які за своїми фізико-механічними властивостями можуть бути запропоновані як основа та поверхневий шар для виготовлення високоміцної зносостійкої тротуарної плитки, яка буде відповідати вимогам ДСТУ. Залучення до виробництва тротуарної плитки різних груп промислових відходів дозволить розширити сировинну базу вітчизняних підприємств, в 2–4 рази знизити собівартість продукції без зниження її якості і зменшити до 80% витрати первинних сировинних ресурсів. Завдяки даним розробкам підприємства-генератори відходів, а також утримувачі полігонів зможуть знизити об'єми накопичених відходів і витрати, пов'язані з природоохоронними заходами, що дозволить мінімізувати негативний вплив накопичених відходів на навколишнє середовище і здоров'я людей.

Подяка

Дослідження здійснені 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. *The cement sustainability initiative: recycling concrete.* – World Business Council for Sustainable Development, 1999. – 40 p.
2. *Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes / Romanovich A., Romanovich M., Belov A., Chekhovskoy E.* // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol.1118. – Art. No. 012035.
3. *Кочешкова І.М.* Зарубіжний досвід утворення та використання доменних шлаків // Економ. вісн. Донбасу. – 2020. – № 2(60). – С.181-186.
4. *Лена В.В., Прогнімак О.Д.* Проблеми утилізації доменних шлаків у контексті переходу до циркулярної економіки // Економ. вісн. Донбасу. – 2021. – № 1(63). – С.129-145.
5. *Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine / Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskiy V., Popovych V., Sai K., Saik P.* // Min. Miner. Depos. – 2019. – Vol.13. – No. 1. – P.24-38.
6. *Dependence of whiteness of decorative slag-alkaline cement from the chemical composition of blast-furnace slags / Krivenko P.V., Gelevera A.G., Kovalchuk A.Yu., Rogozina N.V.* // Bull. Odessa State Acad. Civ. Eng. Architect. – 2021. – No. 83. – P.58-66.
7. *Calorimetric studies of alkali-activated blast-furnace slag cements at early hydration processes in the temperature range of 20–80 °C / Ushero-Marshak A., Vaiciukyniene D., Krivenko P., Bumanis G.* // Materials. – 2021. – Vol.14. – No. 19. – Art. No. 5872.
8. *Kovtun M., Kearsley E.P., Shekhovtsova J.* Dry powder alkali-activated slag cements // Adv. Cem. Res. – 2015. – Vol.27. – No. 8. – P.447-456.
9. *Chithiraputhiran S., Neithalath N.* Isothermal reaction kinetics and temperature dependence of alkali activation of slag, fly ash and their blends // Constr. Build. Mater. – 2013. – Vol.45. – No. 7. – P.233-242.
10. *Chang J.J.* A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes // Cem. Concr. Res. – 2003. – Vol.33. – No. 7. – P.1005-1011.
11. *Research progresses of new type alkali-activated cementitious material catalyst / Zhang Y.J., Yang M.Y., Kang L., Zhang L., Zhang K.* // J. Inorg. Mater. – 2016. – Vol.31. – No. 3. – P.225-233.
12. *Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050 / Miller S.A., John V.M., Pacca S.A., Horvath A.* // Cem. Concr. Res. – 2018. – Vol.114. – P.115-124.
13. *Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps / Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J.H., Thomas M.D.A.* // Cem. Concr. Res. – 2015. – Vol.76. – P.130-146.

14. Aydin S., Baradan B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars // *Compos. B Eng.* – 2014. – Vol.57. – P.166-172.

15. Claudius K., Elinwa A.U., Duna S. Simplex lattice method: a predictive tool for concrete materials // *Am. J. Eng. Res.* – 2017. – Vol.6. – P.19-27.

Надійшла до редакції 07.06.2023

THE EFFECT OF HARDENING ACTIVATORS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SLAG-ALKALINE BINDING MATERIALS

G.M. Shabanova, A.M. Korogodska, V.M. Shumeiko, L.P. Shchukina, G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok *, M.D. Sakhnenko

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

* e-mail: krivobok491@gmail.com

The article presents the results of the study on preparation of rational compositions of slag-alkaline binders using blast furnace granulated slag from JSC «Zaporizhstal», which, according to their physical and mechanical properties, can be suggested as a basis and a surface layer for the production of high-strength wear-resistant paving slabs that will meet the requirements of Ukrainian state standards. The involvement of different groups of industrial waste in the production of paving slabs will allow expanding the raw material base of domestic enterprises, reducing the cost of production by 2–4 times without lowering its quality, and reducing the cost of primary raw materials by up to 80%. Thanks to these developments, waste-generating enterprises, as well as landfill keepers, will be able to reduce the volume of accumulated waste and costs associated with environmental protection measures, which will minimize the negative impact of accumulated waste on the environment and human health.

Keywords: slag-alkaline binder; concrete; alkaline sealant; strength; frost resistance; water absorption; abrasion resistance.

REFERENCES

1. *The cement sustainability initiative: recycling concrete*. World Business Council for Sustainable Development; 1999. 40 p.
2. Romanovich AA, Romanovich MA, Belov AI, Chekhovskoy EI. Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes. *J Phys Conf Ser.* 2018; 1118: 012035. doi: 10.1088/1742-6596/1118/1/012035.
3. Kocheshkova IM. Foreign experience in the formation and use of blast furnace slag. *Donbas Econom Bull.* 2020; 2(60): 181-186. (in Ukrainian). doi: 10.12958/1817-3772-2020-2(60)-181-186.
4. Lepa VV, Prognimak OD. Problems of disposal of blast furnace slag in the context of the transition to a circular economy. *Donbas Econom Bull.* 2021; 1(63): 129-145. (in Ukrainian). doi: 10.12958/1817-3772-2021-1(63)-129-145.
5. Petlovanyi M, Kuzmenko O, Lozynskiy V, Popovych V, Sai K, Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Min Miner Depos.* 2019; 13(1): 24-38. doi: 10.33271/mining13.01.024.
6. Krivenko PV, Gelevera AG, Kovalchuk AYU, Rogozina NV. Dependence of whiteness of decorative slag-alkaline cement from the chemical composition of blast-furnace slags. *Bull Odessa State Acad Civ Eng Architect.* 2021; (83): 58-66. doi: 10.31650/2415-377X-2021-83-58-66.
7. Usherov-Marshak A, Vaiciukyniene D, Krivenko P, Bumanis G. Calorimetric studies of alkali-activated blast-furnace slag cements at early hydration processes in the temperature range of 20–80 °C. *Materials.* 2021; 14: 5872. doi: 10.3390/ma14195872.
8. Kovtun M, Kearsley EP, Shekhovtsova J. Dry powder alkali-activated slag cements. *Adv Cem Res.* 2015; 27(8): 447-456. doi: 10.1680/jadcr.14.00078.
9. Chithiraputhiran S, Neithalath N. Isothermal reaction kinetics and temperature dependence of alkali activation of slag, fly ash and their blends. *Constr Build Mater.* 2013; 45: 233-242. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.061.
10. Chang JJ. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cem Concr Res.* 2003; 33: 1005-1011. doi: 10.1016/s0008-8846(02)01096-7.
11. Zhang YJ, Yang MY, Kang L, Zhang L, Zhang K. Research progresses of new type alkali-activated cementitious material catalyst. *J Inorg Mater.* 2016; 31(3): 225-233. doi: 10.15541/jim20150412.
12. Miller SA, John VM, Pacca SA, Horvath A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cem Concr Res.* 2018; 114: 115-124. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.026.
13. Rajabipour F, Giannini E, Dunant C, Ideker JH, Thomas MDA. Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cem Concr Res.* 2015; 76: 130-146. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.024.
14. Aydin S, Baradan B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. *Compos B Eng.* 2014; 57: 166-172. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.001.
15. Claudius K, Elinwa AU, Duna S. Simplex lattice method: a predictive tool for concrete materials. *Am J Eng Res.* 2017; 6: 19-27.

G.M. Shabanova, A.M. Korogodska, V.M. Shumeiko, L.P. Shchukina, G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, M.D. Sakhnenko