

МОДИФІКАЦІЯ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ ДЛЯ УЛАШТУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ПАЛЬ ВІДХОДАМИ ТЕХНОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Шептун С. Ю., Марченко М. В., Кусков М. А.
Державний біотехнологічний університет

Анотація. Через високу вартість цементу актуальним є питання зменшення його витрати під час виготовлення дрібнозернистого бетону способом додавання техногенних мікродисперсних відходів. Розроблено оптимальний склад дрібнозернистого бетону для формування палі методом пошарового пресування бетонної суміші в середині отвору пробуреної свердловини, що знижує собівартість й екологічне навантаження.

Ключові слова: палі, дрібнозернистий бетон, техногенні відходи.

Вступ

Продовжується розвиток малоповерхового котеджного будівництва. Найпоширенішим типом фундаментів для одно- та триповерхових будинків у сільській місцевості й на околицях міст є стрічкові фундаменти з монолітного бетону або збірних залізобетонних блоків. Вони потребують значного обсягу земляних робіт і є матеріалоемними. Зменшити витрати можливо способом застосування палевих фундаментів.

Раніше їх використання обмежувалось через високу вартість обладнання, однак розвиток технологій дозволив використовувати легкі переносні двигуни для буріння свердловин. Запропоновано метод формування палі способом пошарового пресування бетонної суміші в отворі, що пробурений [11]. Для цього застосовують спеціальну насадку-циліндр з лопатями.

Оскільки за такого способу не використовується арматура, вирішальне значення має міцність самого бетону. Її збільшення можна досягти завдяки використанню техногенних відходів промисловості, що значно підвищить економічну й екологічну ефективність будівництва та промислових підприємств.

Аналіз публікацій

Автори [1] довели, що введення олеату натрію та залізовмісного заповнювача як вторинної сировини суттєво збільшує морозостійкість дрібнозернистого бетону, знижує температурні деформації та підвищує стійкість до змін температури.

У роботі [2] запропоновано використання лужно-мінеральних в'язучих на основі відходів глиноземного виробництва. Бетони мали густину 1815–2311 кг/м³, міцність – 15–28 МПа. Заміна піску золошлаками знижує міцність незначною мірою (до 10 %).

У дослідженнях [3, 6] зазначено, що 30 % суміші золи та шлаку ТЕЦ можна використовувати як ефективний заповнювач. Таку суміш успішно застосовують для друкування конструкцій на 3D-принтері.

У дослідженні [4] використання 20 % золи ТЕС як частки в'язучого забезпечило підвищену довговічність вібропресованих конструкцій. У [5] визначено, що 10 % легкої золи з модифікатором (натрій силікат) сприяє підвищенню характеристик дрібнозернистого бетону.

У роботі [7] доведено ефективність застосування хвостів Полтавського ГЗК у комбінації із суперпластифікаторами, що забезпечує високу міцність дрібнозернистого бетону.

У [9] обґрунтовано можливість використання кам'яного пилу й деревних відходів у дорожніх бетонах, що забезпечує екологічну та ресурсну ефективність. У дослідженні [10] проаналізований процес розроблення рецептур сірчаного бетону з відходів нафтогазової і камінеобробної промисловості.

У світі спостерігається тренд на використання вторинних продуктів у виробництві будівельних матеріалів для забезпечення енергоефективності, кліматичної нейтральності та сталого розвитку. Дослідження ефективності використання місцевих техногенних відходів в Україні надасть значну економічну перевагу в процесі зеленого переходу.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є здешевлення собівартості складу дрібнозернистого бетону для формування палі у ґрунті способом оптимізації складу додаванням відходів техногенного походження.

Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити підбір необхідної рецептури та провести фізико-механічні дослідження.

Виклад основного матеріалу

Для проведення дослідження було використано:

- портландцемент марки ПЦ 1-500 Н, відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-46: 2010, з питомою поверхнею зерен 4300–4500 см²/г;
- пісок кварцовий Безлюдівського кар'єру Харківської області з модулем крупності 1,31 мм;
- шлам від мокрого газоочищення виробництва феросиліцію Запорізького феросплавного заводу;
- керамзитовий пил Харківського керамзитового заводу, що є дрібнодисперсним кремнеземовмісного матеріалу коричневого кольору, який визначається властивостями активних мінеральних добавок, має густину орієнтовно 1300 кг/м³ і питому поверхню в межах 3000–5000 см²/г;
- шлам водопом'якшення, що утворюється на Харківській ТЕЦ-5, який за хімічним складом переважно складається з карбонату кальцію (CaCO₃) – 98,2%, а решту становить діоксид кремнію;
- сульфонафталінформальдегід С-3.

Для збільшення активної площі поверхні шламу від мокрого газоочищення виробництва феросиліцію та шламу водопом'якшення їх сушили, потім подрібнювали за допомогою дезінтегратора, після чого отримали мікронаповнювачі із середньою густиною 180–250 кг/м³ і питомою поверхнею 10000–20000 см²/г.

Після приготування суміші дрібнозернистого бетону її укладали до форми балочки 160×40×40 мм. Зразки виготовляли із сумішей однакової рухомості з осадкою конуса 2 см. Для надання сумішам необхідної рухо-

мості застосовувався суперпластифікатор. Зразки ущільнювались за тиску 1 МПа. Випробування зразків на визначення межі міцності під час розтягування в процесі згинання й на стискання проводили на 3, 7 і 28 добу твердіння.

Спочатку було визначено вплив часу зберігання шламу Запорізького феросплавного заводу у відвалі на міцність цементного каменю. Випробування проводили на пробах

з однаковими складами, що відрізнялися «віком» застосованого шламу. Склади та результати випробувань наведені в табл. 1.

За результатами, наведеними в табл. 1, для подальшого вивчення було вибрано шлам, що зберігався більше ніж 25 років у шламонакопичувачах.

Для визначення оптимального вмісту шламу в складі з інтервалом в 5 % до цементної у суміші, що містить цемент і пісок, додавався шлам у кількості 5–20 % від маси цементу. Результати випробувань зразків на розтягнення під час згинання й межі міцності під стискання наведені в таблиці 2.

Згідно з результатами, наведеними в табл. 1, міцність зразків збільшується в разі збільшення вмісту шламу та досягає максимуму за вмісту шламу в 15 % від маси портландцементу. Більше збільшення вмісту шламу призводить до зниження міцності цементного каменю.

З метою підвищення економічної ефективності процесу улаштування паль і найбільш повного використання потенціалу техногенних відходів, до складу бетонних сумішей додавали керамзитовий пил і шлам водопом'якшення ТЕЦ-5 у кількості 5 і 10 % від маси цементу.

Таблиця 1 – Вплив «віку» шламу ЗФЗ на міцність цементного каменю

Склад	Вміст компонентів			
	Контр.	Шлам 1 рік	Шлам 5 років	Шлам 25 років
Цемент ПЦ I-500, мас. ч.	33			
Пісок, мас. ч.	67			
Вода, В/Ц	0,96			
Шлам (ЗФЗ), % від цементу	-	15%		
Міцність під час згинання, 3 доба (МПа)	1,52	1,72	2,28	2,32
Міцність на стискання, 3 доба (МПа)	3,72	4,24	4,88	5,72
Міцність під час згинання, 7 діб (МПа)	2,66	3,01	3,99	4,06
Міцність на стискання, 7 діб (МПа)	6,51	7,2	8,54	10,01
Міцність під час згинання, 28 діб (МПа)	3,8	4,3	5,7	5,8
Міцність на стискання, 28 діб (МПа)	9,3	10,6	12,2	14,3

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості зразків залежності від вмісту шламу ЗФЗ

Склад	Вміст компонентів				
	Контр.	1	2	3	4
Цемент ПЦ І-500, мас. ч.	33	33	33	33	33
Пісок, мас. ч.	67	67	67	67	67
Вода В/Ц	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Шлам (ЗФЗ), % від цементу	-	5 %	10 %	15 %	20 %
Міцність під час згинання, 3 доба (МПа)	1,52	1,6	2,0	2,12	2,04
Міцність на стискання, 3 доба (МПа)	3,72	3,84	4,48	5,76	5,2
Міцність під час згинання, 7 діб (МПа)	2,66	2,8	3,5	3,71	3,57
Міцність на стискання, 7 діб (МПа)	6,51	6,72	7,84	10,08	9,1
Міцність під час згинання, 28 діб (МПа)	3,8	4,0	5,0	5,3	5,1
Міцність на стискання, 28 діб (МПа)	9,3	9,6	11,2	14,4	13,0

Таблиця 3 – Склад зразків та результати фізико-механічних випробувань

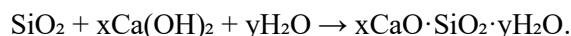
Найменування матеріалу	Вміст компонентів					
	Контр. 1	2	3	4	5	6
Цемент ПЦ І-500, мас. ч.	33,0					
Пісок, мас. ч.	66,5					
Сульфонафталінформальдегід, С-3	0,5					
Шлам (ЗФЗ), % від цементу	-	15	15	15	15	15
Керамзитовий піл (ХКЗ), % від цементу	-	-	-	-	5	10
Шлам водопом'якшення (Харківська ТЕЦ-5), % від цементу	-	-	5	10	-	-
Вода, В/Ц	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
Міцність під час згинання, 3 доба. (МПа)	1,59	2,12	2,65	2,73	3,03	2,96
Міцність на стискання, 3 доба (МПа)	3,81	5,76	7,19	7,31	8,11	7,95
Міцність під час згинання, 7 діб (МПа)	2,80	3,71	3,97	3,88	4,30	4,22
Міцність на стискання, 7 діб (МПа)	6,67	10,08	11,32	10,95	12,15	11,91
Міцність під час згинання, 28 діб (МПа)	3,98	5,3	5,95	5,86	6,65	6,54
Міцність на стискання, 28 діб (МПа)	9,51	14,4	16,19	15,64	17,36	17,01

Під час проведення випробувань на міцність розтягування в процесі згинання та на стискання було отримано результати, подані в табл. 3. Результати експериментальних досліджень доводять, що найвищі показники міцності цементного каменю досягаються за умов комплексного використання шламу мокрого газоочищення виробництва феросиліцію (у кількості 15 % від маси цементу) та керамзитового пилу (5 %).

Водночас введення до складу цементної матриці шламу водопом'якшення Харківської ТЕЦ-5 також забезпечило збільшення міцності, однак ефективність його впливу є нижчою, як порівняти з використанням керамзитового пилу.

Збільшення міцності в разі додавання шламу з ЗФЗ можна пояснити його дрібним гранулометричним складом і високою питомою поверхнею частинок, що зумовлює його виражені пуцоланові властивості та сприятливо впливає

на характеристики розчинів. Шлам активно взаємодіє з гідроксидом кальцію, що утворюється під час гідратації цементу, внаслідок чого збільшується кількість гідратованих силікатів кальцію (CSH) за реакцією



Утворені CSH-фази мають менше співвідношення CaO/SiO_2 , як порівняти зі звичайною гідратацією цементу. Завдяки цьому вони здатні поглинати інші іони, що є важливим для зменшення лужного розширення внаслідок реакції між лугами та заповнювачем.

Введення шламу водопом'якшення сприяє підвищенню міцності дрібнозернистого бетону завдяки утворенню навколо зерен аліту (C_3S) мікрокристалічного шару кальциту, який частково заміщує гідроксид кальцію, що формується під час гідратації. Це підвищує гідратаційну активність системи.

Підвищення міцності цементного каменю в процесі введення керамзитового пилу обумовлено його пластифікувальними властивостями, а також активною участю у фізико-хімічних процесах взаємодії з клінкерними мінералами цементу. Це сприяє формуванню новоутворень, зокрема гідрокарбоалюмінатів і гідрокарбосульфоалюмінатів кальцію. Крім того, високоактивні дисперсні частинки мікронаповнювачів є центрами нуклеації та кристалізації, на поверхні яких інтенсивно осідають продукти гідратації цементу.

Це сприяє формуванню новоутворень, зокрема гідрокарбоалюмінатів і гідрокарбосульфоалюмінатів кальцію.

Додавання шламу ЗФЗ та керамзитового пилу сприяє помітному підвищенню міцності дрібнозернистого бетону на стискання та згинання, що зумовлено утворенням нових хімічних сполук і визначенням додаткових фізико-хімічних взаємозв'язків між ними. Додавання цих компонентів активізує процеси, які впливають не лише на гідратацію цементного клінкеру, а й на формування продуктів взаємодії складових із водою та цементним тістом.

Висновки

Проведено дослідження можливості застосування як наповнювачів дрібнозернистого бетону шламу від мокрого газоочищення виробництва феросиліцію Запорізького феросплавного заводу, керамзитового пилу Харківського керамзитового заводу та шламу водопом'якшення Харківської ТЕЦ-5. Визначено збільшення міцності дрібнозернистого бетону в процесі стискання та згинання до 80 % під час використання техногенних наповнювачів. Найбільший приріст міцності отримано за комбінованого додавання шламу від мокрого газоочищення виробництва феросиліцію та керамзитового пилу.

Такий ефект досягається завдяки підвищенню кількості активних центрів у зоні гідратації й інтенсифікації реакції утворення гідроалюмінатів і гідроферитів кальцію.

Література

1. Шишкіна О. О., Шишкін, О. О. Особливості роботи дрібнозернистих бетонів, призначених для гідротехнічних споруд, під дією негативних і знакозмінних температур. *Розвиток транспорту*. Одеса. 2020. Вип. 2 (7). С. 124–137.
2. Мінеральні в'язучі та бетони на основі техногенних відходів / Т. Haqverdieva et al. *Галузеве*

машинобудування будівництво. Полтава, 2020. Вип. 2(55). С. 66–75.

3. Development of composition of fine-grained concrete based on ash-and-slag wastes for additive technology of manufacturing small architectural forms / Aubakirova Z. et al. *Technobius*. 2024. Issue. 4. P. 0069.
4. Лічнов І. С., Саницький, М. А., Каганов, В. О. Вібропресовані дрібнозернисті наджорсткі бетони із застосуванням мінеральних сумішей нового покоління на основі перероблених золошлакових відвалів теплових електростанцій України. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2024. Вип. 210, С. 69–78.
5. Properties of fine-grained concrete using ash of kazakhstan *EVERGREEN* / G. Zhakypova et al. Kasuga. 2023. Vol. 10. Issue 02. P. 830–841.
6. Effects of combined natural volcanic powders on the thermo-physical and mechanical properties of structural eco-concrete / F. Dif et al. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. P. 101835.
7. Особливо дрібнозернистий бетон із відходів ГЗК для будівельних виробів / А. А. Пługін та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. Вип. 208. С. 79–91.
8. Вандоловський О.Г., Петров А.М. Установка для формування паливних полів: деклараційний патент на корисну модель № 147282. Україна. № заявки u202006614; заявл. 15.10.2020; опубл. 28.04.2021, Бюл. № 17/2021.
9. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive / N. Konovalova et al. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Issue 19, e02318.
10. Structure formation, rheology and properties of sulfur concrete mixtures and sulfur concrete modified with bitumen and stone flour / A.N. Beskopylny et al. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Issue 20, e02917.

References

1. Shyshkina, O. O., Shyshkin, O. O. (2020). Features of the performance of fine-grained concrete for hydraulic structures under the influence of negative and alternating temperatures. *Development of Transport*, Odesa, , Issue 2(7), Pp. 124–137.
2. Haqverdieva, T., Akhmednabiev, R., Bondar, L., Popovich, N. (2020). Mineral binders and concrete based on industrial waste. *Collection of Scientific Papers "Sectoral Mechanical Engineering and Construction"*, Poltava, Issue 2(55), Pp. 66–75.
3. Aubakirova, Z., et al. (2024). Development of composition of fine-grained concrete based on ash-and-slag wastes for additive technology of manufacturing small architectural forms. *Technobius*, Issue 4, P. 0069.

4. Lichnov, I. S., Sanytskyi, M. A., Kahanov, V. O. (2024). Vibropressed fine-grained extra-stiff concretes using new-generation mineral blends based on recycled ash-slag dumps of Ukrainian thermal power plants. *Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport*, Kharkiv, Issue 210, pp. 69–78.
5. Zhakypova, G., et al. (2023). Properties of fine-grained concrete using ash of Kazakhstan. *EVER-GREEN*, Kasuga, Vol. 10, Issue 02, Pp. 830–841.
6. Dif, F., Douara, T., Zaitri, R., Mouli, M. (2020). Effects of combined natural volcanic powders on the thermo-physical and mechanical properties of structural eco-concrete. *Journal of Building Engineering*, Vol. 32, Article 101835.
7. Pluhin, A. A., Chaika, V. M., Musienko, S. M., ogly Nadzhafov, E. F. (2024). Ultra-fine concrete from mining and processing plant waste for construction products. *Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport*, Kharkiv, Issue 208, Pp. 79–91.
8. Vandalovskyi, O. H., Petrov, A. M. (2021). Device for forming pile fields: utility model declaration patent No. 147282, Ukraine. Application No. u202006614; filed 15.10.2020; published 28.04.2021, Bulletin No. 17/2021.
9. Konovalova, N., Pankov, P., Bespolitov, D., Petukhov, V., Panarin, I., Fomina, E., Othman, A. (2023). Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive. *Case Studies in Construction Materials*, Issue 19, e02318.
10. Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban, E. M., Mailyan, L. R., Meskhi, B., Chernil'nik, A., Ananova, O. (2024). Structure formation, rheology and properties of sulfur concrete mixtures and sulfur concrete modified with bitumen and stone flour. *Case Studies in Construction Materials*, Issue 20, e02917.

Шептун Сергій Юрійович, к.т.н., ст. викладач каф. надійності та міцності машин і споруд ім. В. Я. Аніловича, zoooms@btu.kharkov.ua, тел. +38 098-480-66-52.

Марченко Михайло Валентинович, к.т.н., доц. каф. надійності та міцності машин і споруд ім. В. Я. Аніловича mar4enko.mixail78@gmail.com, тел. +38 050-302-68-40.

Кусков Микита Андрійович, аспірант. каф. надійності та міцності машин і споруд ім. В. Я. Аніловича, nikikuskov@gmail.com, тел. +38067-121-09-57.

Державний біотехнологічний університет, вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків, Україна.

Modification of fine-grained concrete for the construction of thin-walled piles using technogenic waste

Abstract. Problem. The high cost of Portland cement production, coupled with the intensive use of energy resources and significant CO₂ emissions, creates the necessity to reduce its consumption in concrete production. Simultaneously, large volumes of fine technogenic waste are being accumulated by various industrial enterprises, including ferrosilicon production, thermal power plants, and construction materials manufacturing. These micro-dispersed by-products are often underutilized, despite their potential to serve as functional additives that can enhance the physical and mechanical properties of concrete mixtures. **Objective.** The study aims to develop and optimize a modified fine-grained concrete mixture by incorporating technogenic waste for the construction of bored piles formed through layered pressing within drilled shafts. **Methodology.** Experimental tests were carried out in accordance with DSTU B V.2.7-187:2009. The physical and mechanical characteristics were determined on prism-shaped samples measuring 160×40×40 mm. Compressive and flexural strengths were evaluated to assess the effectiveness of the proposed mixture. **Results.** A new composition of fine-grained concrete was developed using a combination of wet gas cleaning sludge from ferrosilicon production, expanded clay dust, and sludge from water-softening systems. The optimal ratio of these components was experimentally determined, leading to improved strength parameters and a reduction in cement usage. **Scientific novelty.** For the first time, the combined influence of three types of fine technogenic waste on the structural formation and strength development of fine-grained concrete was comprehensively studied. **Practical significance.** The use of these industrial by-products in concrete contributes to lowering production costs, enhancing material performance, and reducing the environmental footprint of construction practices.

Keywords: piles, fine-grained concrete, man-made exits.

Sheptun Serhii, Ph.D., Senior lecturer Reliability and Strength of Machines and Structures named after V. Ya. Anilovych Department, ORCID: 0000-0002-1981-4560, zoooms@btu.kharkov.ua

Marchenko Mykhailo, Ph.D., Assoc. Prof. Reliability and Strength of Machines and Structures named after V. Ya. Anilovych Department, ORCID: 0000-0001-7897-0371, mar4enko.mixail78@gmail.com.

Kuskov Mykyta, graduate student, Reliability and Strength of Machines and Structures named after V. Ya. Anilovych Department, ORCID: 0000-0001-7204-9872, nikikuskov@gmail.com
State Biotechnological University, 61002, Ukraine, Kharkiv, Alchevskykh St., 44.