

Вплив золи винесення на міцнісні характеристики ґрунтоцементу

Наталя БЛАЩУК¹, Олексій ШЕВЧУК²

Вінницький національний технічний університет
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, Україна, 21000,

¹blaschuk@vntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-9764-0271

²omshevchuk@gmail.com, orcid.org/0009-0009-9382-9750

DOI: 10.32347/0475-1132.51.2025.17-25

Анотація. В даній роботі пропонується використати побічні продукти промислового виробництва в якості мінеральної добавки до складу ґрунтоцементу для покращення економічної та екологічної ефективності матеріалу. Адже при недостатній несучій здатності природних ґрунтових умов необхідно виконувати зміцнення шляхом улаштування армування, одним із перспективних напрямків і являється виконання підсилень з ґрунтоцементних елементів. Головними складовими ґрунтоцементних елементів є ґрунт, який знаходиться безпосередньою на будівельному майданчику, та в'язуча речовина, яка є однією із найдорожчих складових. Тому виходячи із цього в даній роботі пропонується додавати до складу ґрунтоцементу побічні відходи промисловості за для покращення характеристик ґрунтоцементу та здешевлення. Одним із таких відходів і є зола винесення яка добре себе зарекомендувала при додаванні її до бетонних сумішей.

Виконані фізичні дослідження полягали у тому, щоб визначити вплив вмісту золи винесення у складі ґрунтоцементу у якості мінеральної добавки на міцнісні характеристики. Для виконання даного дослідження було розроблено програму дослідження, яка базувалась на поступовому заміщенні в'язучої речовини на золу винесення у певному відсотковому співвідношенні. Для розробки методики виготовлення ґрунтоцементної суміші був проаналізований та перейнятий досвід з попередніх досліджень інших авторів. Для виготовлення зразків



Наталя БЛАЩУК

доцент кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури
к.т.н., доц.



Олексій ШЕВЧУК

аспірант кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури

використовувалися кубічні та призматичні форми, а для покращення процесу тужавіння зразки знаходились на протязі 28 діб у вологому середовищі. Для випробовування зразків на стиск використовувався прес.

Проведення серії дослідів на стиск підтвердило основні висновки щодо доцільності використання золи винесення в якості мінеральної добавки до складу ґрунтоцементної суміші, а поступове заміщення в'язучого на золу винесення до певного відсоткового співвідношення покращує характеристики ґрунтоцементу, а також в свою чергу буде мати позитивний економічний та екологічний ефект.

Ключові слова. ґрунтоцемент, зола-винесення, міцність, мінеральні добавки, міцність на стиск, відходи промисловості.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасному світі та в Україні активно ведеться розбудова міст з кожним роком все більше загострюється питання нестачі вільного простору для розбудови, адже міста розростаються та забудова стає все щільнішою, тому все більше залишається ділянок з несприятливими чи складними умовами для будівництва, що в свою чергу ставить складні задачі перед проектувальниками, а багаторічний досвід, практика будівництва та експлуатації будівель та споруд вказують проектувальникам на те, що при певних інженерно-геологічних умовах при недостатній несучій здатності основ будівель та споруд можуть виникати значні та нерівномірні деформації, особливо це стосується структурно-нестійких ґрунтів, до яких можна віднести пухкі піски, лесові ґрунти, певні підвиди суглинків та глин. Виникнення нерівномірних деформацій, в основному, залежить від фізичних та механічних впливів. До механічних відносять прикладання навантажень та зовнішніх сил, а до фізичних надмірне зволоження, замерзання розмерзання, суфозію вивітрювання та інші. Саме тому закріплення та підсилення основ під будівництво є актуальним завданням сьогодення перед проектувальниками. А одним із ефективних та економічно вигідних варіантів являється використання ґрунтоцементу.

Ґрунтоцемент - це композитний матеріал, який отримується шляхом механічного змішування місцевих ґрунтів (ґрунтів, які знаходяться безпосередньо на будівельному майданчику) з цементом та водою в певних пропорціях, а в результаті процесу гідратації цементу відбувається зв'язування ґрунтових частинок у цільний моноліт, що в свою чергу значно покращує фізико-механічні властивості такі, як міцність на стиск, модуль деформації, водостійкість, морозостійкість та інші. При недостатній несучій здатності природних ґрунтових умов слід застосовувати їх інженерну підготовку шляхом покращення властивостей основи до необхідного рівня на місці їх

залигання або підсилення за рахунок влаштування в них несучих конструктивних елементів, а враховуючи велику вартість залізобетонних чи бетонних конструкцій ґрунтоцементні конструкції все більше набирають популярності. Найпопулярнішими варіантами використання ґрунтоцементу в сучасному світі є:

- влаштування паль за бурозмішувальною технологією;
- підсилення слабких ґрунтів для будівництва доріг;
- струменева цементация (Jet grouting);
- підсилення основ під фундаменти вертикальними чи горизонтальними елементами;
- укріплення укосів;
- створення протифільтраційних завіс;
- влаштування анкерів з ґрунтоцементу.

Ґрунтоцемент, як матеріал, має велику популярність та широкий спектр використання через його переваги, але й недоліки також присутні, основними з яких є відносно невелика міцність у порівнянні з бетонними та залізобетонними конструкціями (Зоценко та ін., 2016; Новицький, 2012), висока пористість та відносно велика вартість за рахунок використання дороговартісного в'язучого матеріалу. Тому різними авторами (Новицький, 2012; Зоценко та ін., 2016) пропонуються різні добавки по типу хвостів (відходи від збагачення корисних копалин), вапна, різних типів пластифікаторів і т.д. А також автором (Нестеренко, 2011) пропонується метод вібрування для покращення характеристик міцності ґрунтоцементу (Karpisz, 2018). Питання можливості покращення характеристик ґрунтоцементу залишається актуальним і надалі, а також триває пошук можливого зниження вартості даного матеріалу. Взявши до уваги те, що з кожним роком збільшуються обсяги використання енергетичного сектору та промислового виробництва, що в свою чергу сприяє утворенню великої кількості побічних продуктів промислового виробництва які мають негативний вплив на навколишнє середовище, а також вимагають утилізації, що тягне за собою великі витрати, питання додавання відходів промисловості

до складу ґрунтоцементну є актуальним на сьогоднішній день.

Одним із таких продуктів є зола винесення (Fly Ash), яка являє собою дрібнодисперсний матеріал, що утворюється в процесі спалювання твердого палива на теплових електростанціях (ТЕС) (Uliasz-Bocheńczyk, et. al, 2023). Кожного року ТЕС генерують мільйони тон золи, велика кількість якої накопичується на спеціалізованих відвалах, що в свою чергу вимагає не тільки виділення великих земельних ділянок під її складування, а й становить екологічну проблему через можливість розносу вітром, забрудненню ґрунту чи ґрунтових вод (Fidanchevski et. al, 2021; Очеретний та ін., 2009). Також, як відомо, зола винесення успішно використовувалась як мінеральна добавка до бетонів, що покращувало властивості матеріалу (Петраш, 2009).

Саме тому в даній роботі пропонується дослідити вплив золи винесення, як мінеральної добавки до ґрунтоцементну на міцнісні характеристики, яка буде заміщувати частину в'язучої речовини для зниження вартості, а також її використання матиме позитивний екологічний ефект

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження ефективності та доцільності використання золи винесення в якості мінеральної добавки до складу ґрунтоцементної суміші.

Була поставлена задача визначити ступінь впливу золи винесення на міцнісні характеристики ґрунтоцементу (міцність на стиск R).

Для виконання поставленої задачі використовувася метод фізичних лабораторних досліджень за допомогою преса, тому експериментальну частину основного дослідження було розподілено на 3 етапи :

1. Розроблення складу ґрунтоцементної суміші з різним відсотком заміщення в'язучого на золу винесення.
2. Виготовлення зразків.
3. Фізичні випробовування міцності зразків на стиск

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вихідними матеріалами для виготовлення ґрунтоцементну було прийнято цемент, золу винесення Київської ТЕС, ґрунт, воду.

В якості ґрунту (рис 1) був використаний суглинок лесоподібний, твердий, просадковий, високо пористий, жовто-коричневий з характеристиками:

- щільність ґрунту $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$;
- вологість ґрунту $W = 0,113$;
- вологість на межі розкочування

$W_p = 0,181$;

• вологість на межі текучості $W_L = 0,263$.

Для виготовлення зразків в якості в'язучого прийнято цемент марки М400. Цемент виготовлений згідно ДСТУ Б В. 2.7-46-96. Цемент марки М400 відноситься до виду портландцементу, до складу якого входять породи карбонатної та глинистих груп, оксиди алюмінію, кальцію, заліза, магнію, кремнію, тонкий клінкерний помел, гіпс та мінеральні добавки. Ці складові служать для покращення характеристик таких як еластичність, міцність, швидкість тужавіння.

Вода, яка використовувалась, не містить шкідливих домішок, що могли б зашкодити процесу тужавіння ґрунтоцементну, показник $pH = 8$, слабо лужна, слабомінералізована, гідрокарбонатно-кальцієва.

В якості мінеральної добавки використовували золу-винесення Київської ТЕС. Зола винесення - це побічний продукт, який утворюється внаслідок спалювання твердих палив на ТЕС, вона являє собою дрібнодисперсний порошок. Основні фізико-механічні властивості :

- гідравлічна активність $0,4 \text{ МПа}$;
- питома поверхня $2000 \dots 3000 \text{ см}^2/\text{г}$;
- насипна густина 1150 кг/м^3 ;
- істинна густина $1,95 \text{ г/см}^3$.

Хімічний та мінералогічний склад відповідають основним вимогам, що висуваються до золи для бетонів.

Для дослідження впливу золи винесення на міцнісні характеристики ґрунтоцементу виконано випробування кубиків та призм на стиск R з різним відсотком заміщення в'язучої речовини на золу винесення.

Табл. 1. Хімічний склад золи винесення Київської ТЕС
 Tabl. 1. Chemical composition of fly ash from the Kyiv TPP

Оксиди	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
Масова частка оксидів, %	55,3	1,4	22,34	5,42	2,52	0,12	2,46	5,96	0,75	2,46	0,38	0,33



Рис. 1 – Ґрунт, який використовувався
 Fig. 1 – Used soil



Рис. 2 – Процес виготовлення та укладання
 Fig. 2 - Manufacturing and installation process

Випробування проводились згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009, як для бетонів з урахуванням ДСТУ Б В.2.1-4-96.

Метою експериментальних досліджень було визначення максимального відсотка заміщення в'язучої речовини на золу винесення з мінімальними втратами міцнісних характеристик ґрунтоцементу відносно зразка без вмісту золи винесення.

Для виготовлення ґрунтоцементної суміші було прийнято пропорцію 1:5 (20% в'язучої речовини від ваги ґрунту), а також водоцементне відношення 0,7-1,0. Для отримання ґрунтоцементної суміші змішувались цемент та вода у відповідності до прийнятого водоцементного відношення,

після чого в отриманий розчин додавався ґрунт та зола винесення у необхідній кількості з поступовим перемішуванням на протязі 5-7 хвилин (до утворення однорідної маси), після чого отриману ґрунтоцементну суміш викладали у форми з ущільненням (рис 2).

Згідно до нормативної документації було виконано 6 замісів по три зразки з різним відсотковим заміщенням в'язучого на золу винесення. Після викладення ґрунтоцементної суміші в форми, зразки витримувались на протязі 3-х діб в лабораторних умовах, потім були переміщені у воду та витримувались на протязі 28 діб (рис 3).



Рис. 3 – Витримування зразків у вологому середовищі

Fig. 3 – Exposing samples in a humid environment

Керуючись багаторічним досвідом авторів (Гріщенко Р. П., Масвська І. В. Аналіз міцності ґрунтоцементу при частковій заміні ґрунту на золу виносення. / Енергоефективність в галузях економіки України. Міжнародна н/т конф. ВНТУ, Вінниця, 2019; Блащук Н.В. Масвська І. В. (2020) Використання золи виносення у складі ґрунтоцементу) було розроблено склад (відсоткове співвідношення кількості золи виносення від в'язучого матеріалу) та програму дослідження, які наведені у таблиці 2.

В результаті проведення дослідження за допомогою пресу було отримано дані міцності кубічних та призматичних ґрунтоцементних зразків (графіки, рис 4 -10).

Табл. 2. Програма дослідження зразків виготовлених із ґрунтоцементу з додаванням золи виносення
Table 2. Research program for samples made from soil cement with the addition of fly ash

№ п/п	Цемент, г	Зола, г	Ґрунт, г	Вода, г	Зола % від в'язучого	Цемент % від ґрунту
Кубічні зразки						
1	1300	0	6500	1300	0	20
2	1170	130	6500	1300	10	18
3	1040	260	6500	1300	20	16
4	910	390	6500	1300	30	14
5	780	520	6500	1300	40	12
6	650	650	6500	1300	50	10
Призматичні зразки						
1	1200	0	6000	1200	0	20
2	1080	120	6000	1200	10	18
3	960	240	6000	1200	20	16
4	840	360	6000	1200	30	14
5	720	480	6000	1200	40	12
6	600	600	6000	1200	50	10

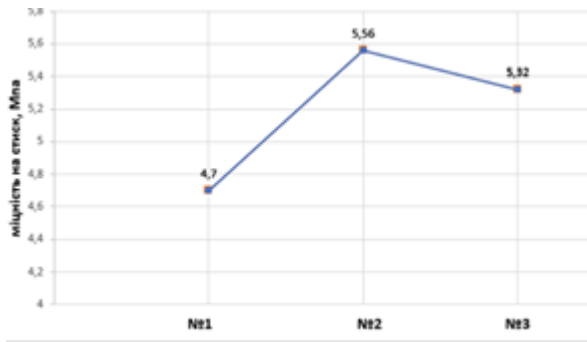


Рис. 4. Міцність ґрунтоцементу без вмісту золи винесення від в'язучого

Fig. 4. Strength of soil cement without fly ash content from the binder

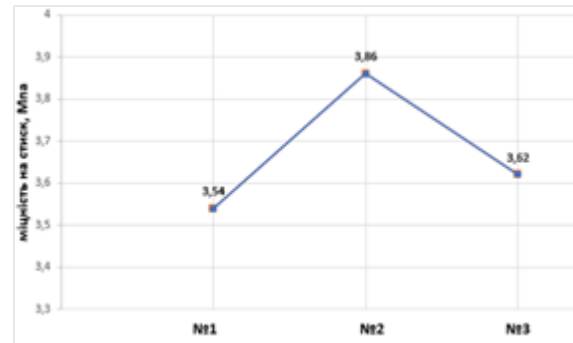


Рис. 7. Міцність ґрунтоцементу з 30% золи винесення

Fig. 7. Strength of soil cement with 30% fly ash

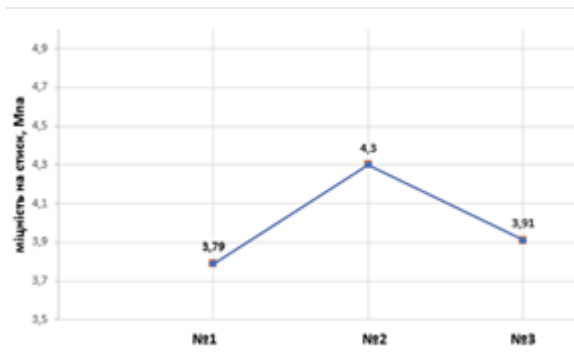


Рис. 5. Міцність ґрунтоцементу з 10% золи винесення

Fig. 5. Strength of soil cement with 10% fly ash

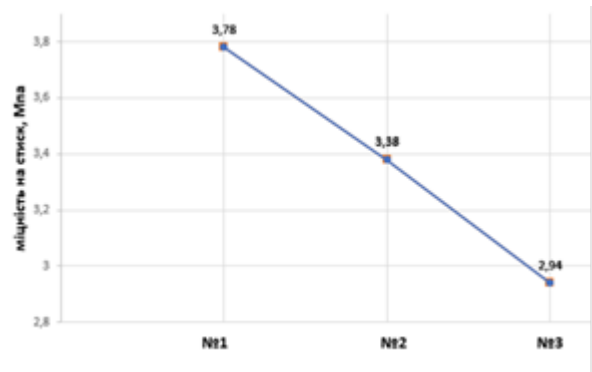


Рис. 8. Міцність ґрунтоцементу з 40% золи винесення

Fig. 8. Strength of soil cement with 40% fly ash

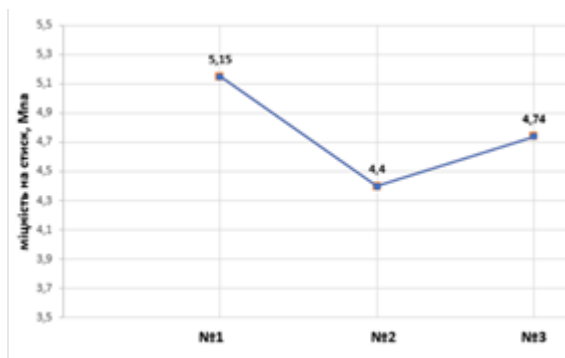


Рис. 6. Міцність ґрунтоцементу з 20% золи винесення

Fig. 6. Strength of soil cement with 20% fly ash

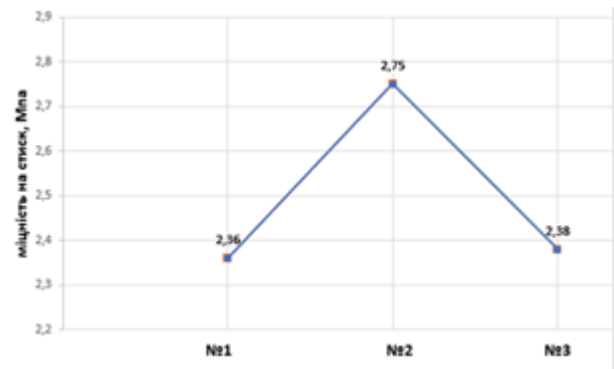


Рис. 9. Міцність ґрунтоцементу з 50% золи винесення

Fig. 9. Strength of soil cement with 50% fly ash

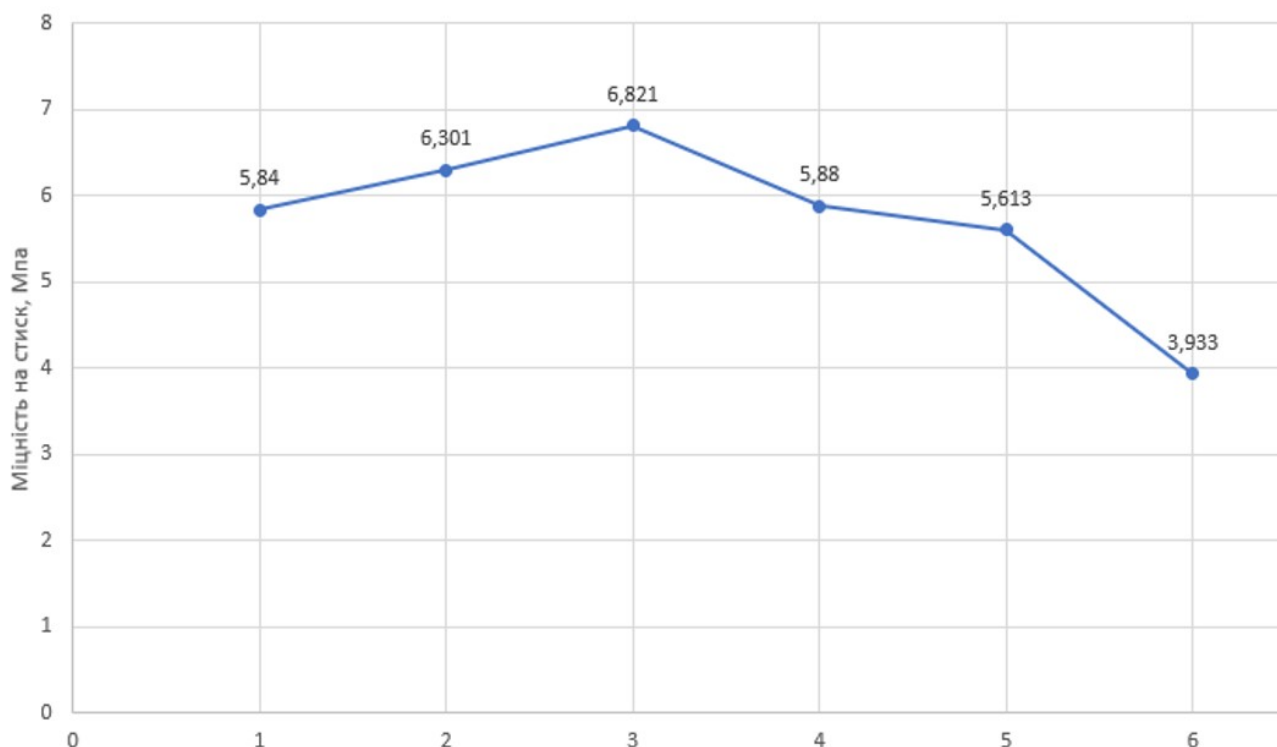


Рис. 10. Міцність призматичних зразків

Fig. 10. Strength of prismatic samples

Проаналізувавши отримані дані з графіків видно, що зразки в яких заміщували 10% від ваги в'язучого на золу винесення міцність на стиск в кубічних зразках коливається в межах 3,79-4,3 МПа, в зразках які містили 20% золи від в'язучого міцність на стиск коливається в межах 4,4-5,15 МПа, а в зразках з 30% вмісту золи винесення від в'язучого міцність становила 3,54-3,86 МПа, а при збільшенні вмісту золи винесення до 40-50% міцність ґрунтоцементних зразків починає знижуватись до 2,36 МПа. В призматичних зразках спостерігаємо збільшення міцності при додаванні золи винесення в межах від 10% до 30%, після чого міцність поступово зменшується, максимальний показник становив 6,821 МПа при заміщенні 20% в'язучого золою винесення.

Багаторічний досвід використання ґрунтоцементну говорить про те, що отримані результати міцності є цілком достатніми для зміцнення ґрунтових основ, закріплення укосів та інших варіантів використання ґрунтоцементу, а в деяких випадках та при

певних умовах будуть достатніми для влаштування ґрунтоцементних паль.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Застосування золи винесення, як мінеральної добавки до складу ґрунтоцементу, має позитивний ефект. При додаванні оптимальної кількості (за результатами дослідження 10-30% заміщення в'язучого) золи винесення може бути отримана необхідна міцність ґрунтоцементних елементів, а також використання золи винесення буде позитивно відображатись на економічному та екологічному ефекті, адже цемент - найдорожча складова ґрунтоцементу, а зола винесення потребує утилізації та становить загрозу забрудненню навколишнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко В. М. (2016) Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: *Монографія*. Харків: «Друкарня Мадрид».

2. Pham, T. A., Kyokawa, H., Koseki, J., & Dias, D. (2022). A new index for the strength analysis and prediction of cement-mixed soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(4), 1512–15343.
3. Новицький, О. П. (2012). Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*, 4(34), 171–177.
4. Нестеренко, Т. М. (2011). Вплив вібравання на механічні характеристики ґрунтоцементу. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво)* (Вип. 75, кн. 2, с. 656–660). ДП НДІБК
5. Uliasz-Bocheńczyk, A., & Mokrzycki, E. (2023). Recovered fly ashes as an anthropogenic raw material. *Minerals*, 13(5), 623. DOI:10.3390/min13050623
6. Очеретний, В. П., Ковальський, В. П., & Бондар, А. В. (2009). Використання відходів вапняку та промислових відходів у виробництві сухих будівельних сумішей. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 6(1), 36–40
7. Fidanchevski, E., Angjusheva, B., Jovanov, V., Murtanovski, P., Vladiceska, Lj., & Stamatovska, N. (2021). Technical and radiological characterization of fly ash and bottom ash from thermal power plant. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 330(9), 4065–4075. DOI:10.1007/s10967-021-07980-w
8. Karpisz, I., Pyda, J., Cichy, L., & Sobala, D. (2018). Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365(4), Article 042061. DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042061
9. Петраш, Р. В. (2009). *Спільна робота ґрунту та елементів армування, які виготовлені за бурозмішувальною технологією* [Кандидатська дисертація, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка]
10. Гріщенко, Р. П., & Маєвська, І. В. (2019). Аналіз міцності ґрунтоцементу при частковій заміні ґрунту на золу винесення. *Енергоефективність в галузях економіки України : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. ВНТУ. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2019/paper/viewFile/8263/6946>.
11. Блащук Н.В. Маєвська І. В. (2020) Використання золи винесення у складі ґрунтоцементу.

my.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/allfbtegp-2020/paper/download/9154/7828>.

REFERENCES

1. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Y. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi hruntotsementni pali, yaki vyhotovliayut-sia za burozmishuvальnym metodom: Monohrafiia* [Drill soil-cement piles made by the soil-mixing method: Monograph]. Kharkiv, Drukarnia Madrid. (in Ukrainian)
2. Pham, T. A., Kyokawa, H., Koseki, J., & Dias, D. (2022). A new index for the strength analysis and prediction of cement-mixed soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(4), 1512–15343.
3. Novitskyi, O. P. (2012). Vplyv plastyfikuiuchykh dobavok na mitsnist gruntolumentu [The influence of plasticizing additives on the strength of soil-cement]. *Zbirnyk Naukovykh Prats (Haluzeve Mashynobuduvannia, Budivnytstvo)*, 4(34), 171–177. Poltava National Technical University. (in Ukrainian)
4. Nesterenko, T. M. (2011). Vplyv vibruvannya na mekhanichni kharakterystyky gruntotsementu. [The influence of vibration on the mechanical characteristics of soil cement]. *Budivelni konstruktsiyyi: Mizhvidomchyy nauko-vo-tekhnichnyy zbirnyk naukovykh prats (budivnytstvo)*, 75(2), 656–660. DP NDIBK (in Ukrainian)
5. Uliasz-Bocheńczyk, A., & Mokrzycki, E. (2023). Recovered fly ashes as an anthropogenic raw material. *Minerals*, 13(5), 623. DOI:10.3390/min13050623
6. Ocheretnyi, V. P., Kovalskyi, V. P., & Bondar, A. V. (2009). Using limestone waste and industrial waste in the production of dry building mixtures. *Suchasni Tekhnolohii i Konstruktsii v Budivnytstvi*, 6(1), 36–40. (in Ukrainian)
7. Fidanchevski, E., Angjusheva, B., Jovanov, V., Murtanovski, P., Vladiceska, Lj., & Stamatovska, N. (2021). Technical and radiological characterization of fly ash and bottom ash from thermal power plant. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 330(9), 4065–4075. DOI:10.1007/s10967-021-07980-w
8. Karpisz, I., Pyda, J., Cichy, L., & Sobala, D. (2018). Study of the effect of cement

- amount on the soil-cement sample strength. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 365(4), Article 042061. DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042061
9. Petrash, R. V. (2009). *Spilna robota gruntu ta elementiv armuvannia, yaki vyhotovleni za bu-rozmishuvalnoiu tekhnolohiieiu* [Joint work of soil and reinforcing elements made using the soil-mixing technology] (Doctoral dissertation, Poltava National Technical University). (in Ukrainian)
 10. Hrishchenko, R. P., & Maievska, I. V. (2019). Analiz mitsno-sti gruntotsementu pry chastkovii zamini gruntu na zolu vynosennia [Analysis of the strength of soil-cement with partial replacement of soil with fly ash]. In *Enerhoefektyvnist v haluziakh ekonomiky Ukrainy* [Energy efficiency in the branches of the economy of Ukraine] [Conference proceedings]. VNTU. (in Ukrainian) <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2019/paper/viewFile/8263/6946>.
 11. Blashchuk N.V. Mayevs'ka I. V. (2020) Vy-korys-tannya zoly vynesennya u skladi gruntotsementu. [Use of fly ash in the composition of soil cement] (in Ukrainian) <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/allfbtegp2020/paper/download/9154/7828>.

wastes is takeaway ash, which has proven itself well when added to concrete mixtures. The physical experiments performed were to determine the effect of adding removal ash to the soil cement composition as a mineral additive on strength characteristics, namely compressive strength. To carry out this study, a research program was developed, which was based on the gradual replacement of the binder with the ash of removal in a certain percentage. To develop a method for the manufacture of a soil cement mixture, the experience of previous studies of other authors was analyzed and adopted. Cubic and prismatic molds were used for the production of samples, and to improve the hardening process, the samples were kept for 28 days in a humid environment. A press was used to test the samples for compression. Conducting physical experiments on compression confirmed the main conclusions regarding the expediency of using removal ash as a mineral additive to the composition of the soil cement mixture, and the gradual replacement of the binder with ash removal to a certain percentage improves the characteristics of soil cement, and will also have a positive economic and environmental effect.

Key words. soil cement, removal ash, strength, mineral additives, compressive strength, industrial waste.

The effect of removal ash on the strength characteristics of soil cement

Natalya BLASHCHUK
Oleksii SHEVCHUK

Summary. In this work, it is proposed to use by-products of industrial production as a mineral additive to the composition of soil cement to improve the economic and environmental efficiency of the material. Indeed, with insufficient bearing capacity of natural soil conditions, it is necessary to perform reinforcement by arranging load-bearing structural elements, one of the promising directions is the implementation of reinforcements from soil-cement elements. One of the main components of soil cement elements is the soil, which is directly on the construction site, and the other component is the binder, which is one of the most expensive components. Therefore, based on this, in this work, it is proposed to add industrial by-products to the soil cement composition to improve the characteristics of soil cement. One of these