

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.138.23:624.012.25 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.350-357](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.350-357)

С. В. Біда, доц., канд. техн. наук, О. В. Петраш, доц., канд. техн. наук,

Р. В. Петраш, доц., канд. техн. наук

*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: serhii.bida@pdau.edu.ua*

Ефективність армування ґрунтоцементних елементів, влаштованих за бурозмішувальною технологією

Проаналізовано досвід підсилення основ фундаментів будівель і споруд шляхом утворення ґрунтоцементних елементів різними способами. Акцентовано увагу на перевагах таких елементів, влаштованих за бурозмішувальною технологією. Недоліком ґрунтоцементних елементів є їх відносно низька міцність за матеріалом. Підвищення несучої здатності можливе за рахунок їх армування, однак занурення каркасу у ґрунтоцемент є проблематичним. Запропоновано спосіб, що дозволяє збільшити глибину армування ґрунтоцементних елементів.

підсилення основ, ґрунтоцемент, бурозмішувальна технологія, армування

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток будівництва з одного боку дозволяє зводити більш високі будівлі і споруди, змінювати конструктивні схеми будівель для більш ефективного використання внутрішнього простору, будувати на територіях, що раніше вважались малопридатними для сучасних будівель. Збереження земель сільськогосподарського призначення спонукає до використання для будівництва територій, розміщених на схилах, на підроблюваних територіях, складених насипними, намівними, слабкими, засоленими, просадочними ґрунтами та ґрунтами з іншими особливими властивостями. Підвищення навантажень на основу, яка має недостатню міцність, вимагає від будівельників застосовувати фундаменти, здатні витримати ці навантаження, або ж вжити заходів для підвищення несучої здатності основи. Використання фундаментів, що передають навантаження на глибоко розміщені шари ґрунту значно збільшує вартість і терміни будівництва, використання спеціальної техніки та часто вимагає виконання робіт з улаштування фундаментів спеціалістами високої кваліфікації. Тому останнім часом значна увага приділяється розвитку технологій підсилення ґрунтів основи, що дозволяє в кінцевому результаті використати фундаменти неглибокого закладання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно класифікації, розробленій М.Л. Зоценком [1] підсилення основ може бути виконане різними способами – як з вийманням ґрунту (влаштування ґрунтових чи піщаних подушок), так і без нього (ущільнення трамбівками чи з використанням ґрунтових паль, термічною чи електрохімічною обробкою ґрунту та нагнітанням у ґрунт в'язучих речовин). Особливу увагу при підсиленні основ приділяють останнім способом, так як вони не пов'язані з вийманням ґрунту і дозволяють виконати роботи у стиснуті строки.

Підсилення ґрунтів шляхом нагнітання у ґрунт в'язучої речовини пов'язане з використанням обладнання, здатного створити необхідний тиск для проникнення в'язучого у ґрунт або ж для руйнування структури ґрунту і перемішування його з в'язучим [2-6]. Так, якщо для звичайної цементації необхідне обладнання, здатне

створювати тиск до 0,4 МПа, то нагнітання цементно-силікатних, піщано-цементно-силікатних розчинів та особливих композитних розчинів ін'єктуванням виконують під тиском до 0,8 МПа, а струменева цементация (JET GROUTING), за якою відбувається одночасне руйнування і перемішування ґрунту з цементним розчином у режимі тіх-іп-пласе (перемішування на місці), потребує використання енергії високонапірного струменя (35-70 МПа). Отримані різними способами ґрунтоцементні елементи широко використовуються у будівництві для підсилення слабких основ, влаштування утримуючих, огорожуючих, гідроізоляційних чи відокремлюючих споруд при зведенні підземних частин чи фундаментів будівель і споруд [7, 8].

Звичайно, такі технології дозволяють влаштувати окремі масиви (палі) підсиленого ґрунту значних розмірів, однак виникає питання щодо контролю постійності перерізу утворених елементів у ґрунтових масивах, особливо у тих, що характеризуються неоднорідністю складу, наявністю включень чи послаблених зон. Цих недоліків можна уникнути, використовуючи інший метод подання в'язучого у ґрунтовий масив – створення ґрунтоцементних елементів за бурозмішувальною технологією.

Бурозмішувальна технологія вже тривалий час широко застосовується для підсилення основ, складених слабкими ґрунтами шляхом підвищення фізико-механічних властивостей цих ґрунтів [9, 10]. Суть технології заключається в розпушуванні ґрунту безпосередньо у свердловині за допомогою спеціальної бурової насадки без виймання його на поверхню і ретельному перемішуванні його з водоцементною суспензією. Водоцементна суспензія (цементний розчин різної консистенції залежно від характеристик ґрунтів) подається до свердловини розчинонасосом під тиском 0,2 – 0,5 МПа. Після твердіння ґрунтоцементної суміші утворюється каменеподібний матеріал, який не розмокає у водонасичених умовах, має густину 1,8 – 1,9 т/м³, міцність 2–3,5 МПа.

Спосіб влаштування ґрунтоцементних паль (ґрунтоцементних елементів) за бурозмішувальною технологією має ряд переваг перед іншими способами:

- висока мобільність комплексу обладнання, необхідного для виготовлення ґрунтоцементних елементів;
- низький рівень динамічної дії на ґрунтову основу, що робить можливим використання такої технології на схилах, при влаштуванні утримуючих протизсувних споруд;
- легке варіювання параметрів ґрунтоцементних елементів шляхом зміни діаметру робочого обладнання чи глибини елементів;
- можливість використання методу підсилення ґрунтів у обмеженому просторі, що дає можливість підсилювати основу існуючих будівель і споруд, наприклад при піднятті рівня ґрунтових вод;
- низький рівень шуму та вібрації, що надає переваг методу з точки зору охорони праці;
- відсутність залежності технологічного процесу від постачання сумішей чи матеріалів;
- можливість влаштування майданчика для підготовки суміші в'язучого за межами робочого простору, або ж використання суміші в'язучого, підготовленої у заводських умовах;
- можливість виконання підсилення ґрунтів з різноманітними особливими властивостями, включаючи обводнені ґрунти;
- відсутність впливу погодних факторів на технологічний процес;
- заощадливе використання цементного розчину;

- контроль за витратами цементного розчину, що дозволяє отримати однорідність ґрунтоцементного елемента по всій довжині;
- контроль за витіканням пульпи на поверхню землі, та відсутність проблеми її утилізації;
- використання широкодоступного обладнання для влаштування ґрунтоцементного елемента, що не потребує наявності фахівців високої кваліфікації;
- міцність отриманих ґрунтоцементних елементів, отриманих за інших рівних умов, порівняна з міцністю елементів, отриманих за технологією jet grouting;
- відсутність необхідності використання глинистих розчинів чи обсадних труб для збереження постійного перерізу елементів, оскільки рідкий ґрунтоцемент спроможний самостійно утримувати стійке положення стінок свердловини;
- відсутність використання привізних ґрунтів для влаштування ґрунтоцементних елементів;
- можливість легкого регулювання ступеня підсилення ґрунтової основи шляхом зміни розмірів сітки влаштування ґрунтоцементних елементів;
- можливість влаштування суцільних стінок із ґрунтоцементу для створення водонепроникних завіс та розділюючих стінок між близько розміщеними будівлями.

Постановка завдання. Необхідно відзначити, що суттєвим недоліком ґрунтоцементних елементів у порівнянні з бетонними є їх відносно низька міцність за матеріалом. Перевагою бетонних елементів є можливість їх армування металевими каркасами як при виготовленні у збірному варіанті, так і при бетонуванні влаштованих порожнин. Армування ґрунтоцементних елементів є технологічно більш складним процесом, оскільки їх влаштування ведеться без виймання ґрунту. Тому метою даної роботи є пошук способів виконання ефективного армування ґрунтоцементних елементів під час їх влаштування. Для досягнення мети необхідно виконати такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи армування ґрунтоцементних елементів та виявити їх недоліки;
- вибрати найбільш ефективний спосіб армування ґрунтоцементних елементів;
- вдосконалити спосіб армування з урахуванням можливості використання того ж обладнання, яким влаштовуються ґрунтоцементні елементи.

Вирішення задачі підвищення міцності ґрунтоцементних елементів дозволить значно розширити область їх використання та застосовувати їх з більшою ефективністю.

Виклад основного матеріалу. Для збільшення міцності ґрунтоцементу вдавались до багатьох способів. Так, окрім цементу у ґрунт додавали золу виносу [11-14], пластифікуючі добавки [15], піддавали ґрунтоцемент впливу вібрації [16], виконували армування синтетичними матеріалами [17]. Підвищити міцність ґрунтоцементних елементів можливо також за рахунок збільшення кількості цементу, однак такий шлях має свою межу, адже будь-який ґрунт у природному стані має свій показник пористості, а враховуючи, що при виготовленні ґрунтоцементних елементів за бурозмішувальною технологією у ґрунт подається цементне молоко, повне заповнення пор неможливе. Ще більш актуальним цей фактор стає при підсиленні насичених водою ґрунтів, адже в такому випадку пори ґрунту майже повністю заповнені водою.

Тому найбільш прийнятним способом підвищення міцності ґрунтоцементних елементів є їх армування металевими елементами.

Раніше була доведена можливість армування ґрунтоцементу, оскільки виконується основна передумова сумісної роботи цього матеріалу з арматурою – близькість значень коефіцієнта теплового лінійного розширення обох матеріалів.

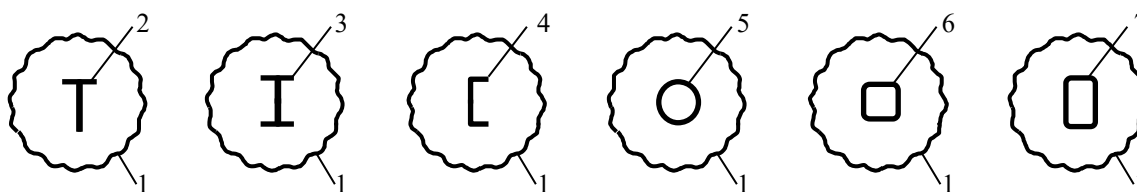
Питання корозійної стійкості арматури розглядалось у роботах [18, 19] з метою довести, що ґрунтоцемент створює достатній захист каркасу від впливу вологи, особливо враховуючи що виготовлення та експлуатація ґрунтоцементних елементів передбачається у обводнених ґрунтах, а в деяких випадках ґрунтові води можуть створювати агресивне середовище.

Водонепроникні властивості ґрунтоцементу вивчалися в лабораторних умовах шляхом виготовлення зразків із суміші лесових суглинків (оскільки саме такі ґрунти при обводненні переходять у категорію слабких ґрунтів) з портландцементом марки М400. Вміст портландцементу становив 20 % від ваги сухого ґрунту, водоцементне відношення розчину – $V/C = 1$. Після виготовлення зразки зберігалися у вологих умовах протягом 28 діб. Випробування проводились стандартним методом «микрої плями». Водонепроникність серії зразків оцінювалась максимальним тиском води, за якого на чотирьох із шести зразків не спостерігалось просочування води. У результаті було визначено, що ґрунтоцемент відповідає марці за водонепроникністю W14.

Паралельно проводились випробування зразків ґрунтоцементу на водонепроникність експрес-методом з використанням пристрою ВВ-2. Результати випробувань також підтвердили, що водонепроникність ґрунтоцементу відповідає марці W14.

Таким чином на основі проведених випробувань визначено, що близькість коефіцієнтів теплового розширення ґрунтоцементу та арматури, низька проникність та однорідність ґрунтоцементу дає можливість проводити армування ґрунтоцементних елементів.

З огляду на те, що армування ґрунтоцементних елементів каркасом на значну глибину проблематично, навіть майже відразу після їх виготовлення, використовуються способи армування таких конструкцій з використанням прокатних профілів (тавр, двотавр, швелер, труби круглого, квадратного чи прямокутного перерізу тощо), які розміщуються по центру поперечного перерізу.



(1 – ґрунтоцементний елемент; 2 – 7 – прокатні профілі) (тавр, двотавр, швелер, труба круглого перерізу, труба квадратного перерізу, труба прямокутного перерізу відповідно)

Рисунок 1 – Схеми армування ґрунтоцементних елементів прокатними профілями
Джерело: розроблено авторами

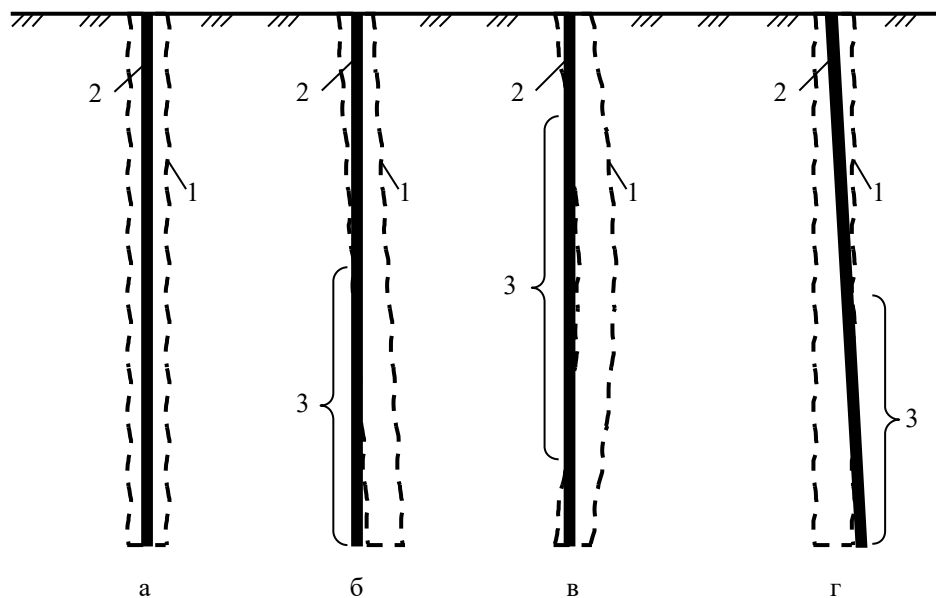
На перший погляд такий метод має переваги з точки зору полегшення занурення за рахунок значної жорсткості армуючого елемента, створення сприятливих умов для набору міцності ґрунтоцементної суміші, розміщеної в середині замкнутих профілів, збільшення площі контакту армуючого елемента з ґрунтоцементом, що покращує умови їх сумісної роботи.

Однак досвід влаштування ґрунтоцементних елементів показує, що тіло ґрунтоцементного елемента може мати не вертикальне положення, а похиле, а іноді і вигнуте по довжині. У такому випадку при армуванні тіла ґрунтоцементного елемента жорсткими профілями фіксується вихід профіля за межі тіла ґрунтоцементного елемента, що робить неможливою їх сумісну роботу. Такий же ефект можна

спостерігати при найменшому відхиленні жорсткого профілю від вертикального положення.

З іншого боку концентрація арматури призводить, у свою чергу, до нерівномірного розподілу напружень по площі поперечного перерізу елемента та їх концентрації біля армуючого елемента, що може призвести до його «продавлювання» через ґрунтоцементний елемент. Та і відомо, що армовані елементи працюють значно краще при розосередженні арматури по поперечному перерізу.

Тому дослідження проводились за умови армування ґрунтоцементних елементів арматурними каркасами. Виявилось, що занурення арматурних каркасів у ґрунтоцемент можливе лише на обмежену глибину, адже наявність поперечної арматури (кількість якої збільшується з глибиною занурення каркасу) потребує значного зусилля вдавлення, що, в свою чергу, призводить до втрати стійкості каркасу, його деформації та втрати проектного положення. Використання вібрації для полегшення занурення каркасу призводить до більшого ущільнення ґрунтоцементної суміші і, як наслідок, погіршення умов занурення каркасу. Тому використання армування верхньої частини ґрунтоцементних елементів можливе, наприклад, за необхідності забезпечення їх жорсткого закріплення з ростверком чи фундаментною плитою.



а – співвісне положення ґрунтоцементного елемента і армуючого профілю; б – нахил ґрунтоцементного елемента; в – вигин ґрунтоцементного елемента; г – нахил армуючого елемента
(1 – ґрунтоцементний елемент; 2 – прокатний профіль; 3 – зона виходу профіля за межі тіла ґрунтоцементного елемента)

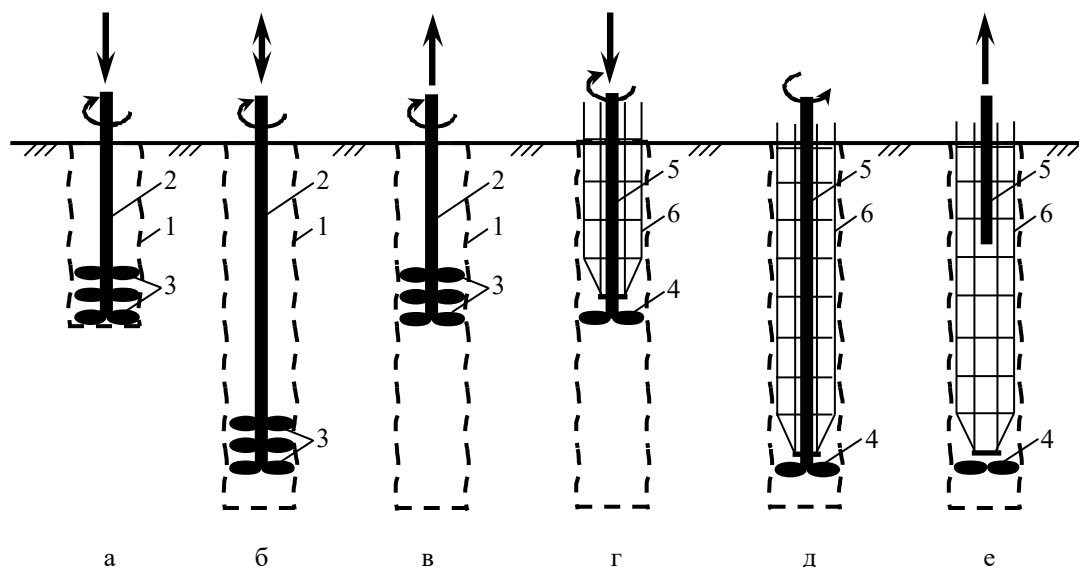
Рисунок 2 – Вихід профіля за межі тіла ґрунтоцементного елемента

Джерело: розроблено авторами

Армування ґрунтоцементного елемента окремими стрижнями потребує менше затрат, однак не гарантує проектного положення стрижня по всій довжині елемента, включаючи його можливий вихід за межі ґрунтоцементу, що з одного боку не дозволить елементу мати необхідну несучу здатність, а з іншого – неминуче призведе до корозії арматури яка не захищена ґрунтоцементом.

Виникає питання розробки технології армування ґрунтоцементних елементів, яка б дозволила значно збільшити глибину занурення каркасу.

Суть такої технології полягає у використанні ефекту «розрідженого» стану ґрунтоцементу в якому він перебуває під час перемішування суміші. Перед зануренням каркасу його необхідно приєднати до зовнішньої пустотілої циліндричної штанги, всередині якої розміщена внутрішня штанга зі знімними ножами на вістрі. Під час занурення ножі, обертаючись за допомогою внутрішньої штанги, розпушують ґрунт і підтримують його у пластичному стані. Обидві штанги опускаються одночасно, разом із зовнішньою штангою проводиться занурення каркасу. Кріплення до штанги дозволяє зберігати каркасу проектне положення. Після досягнення проектної глибини штанги підіймаються, від'єднуючись від каркасу та залишаючи знімний ніж під каркасом. Для забезпечення цілісності ґрунтоцементного елемента підняття штанг відбувається паралельно з вібруванням, що дозволить уникнути утворення порожнин у тілі елемента. Глибина армування елемента каркасом з використанням такого методу буде значно більшою ніж при армуванні способом вдавлювання каркасу.



а-в – влаштування ґрунтоцементного елемента; г – занурення арматурного каркасу;

д – від'єднання знімних ножів ; е – підйом штанг

(1 – ґрунтоцементний елемент; 2 – пустотіла штанга для подачі цементного розчину; 3 – насадка для розпушування ґрунту; 4 – знімний ніж на внутрішній штанзі; 5 – зовнішня штанга; 6 – каркас)

Рисунок 3 – Схема влаштування армованого ґрунтоцементного елемента

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Існуючі методи не завжди дозволяють провести надійне армування ґрунтоцементних елементів. Так, армування прокатними профілями, з одного боку, не може забезпечити надійність проектного положення профіля у ґрунтоцементному елементі, з іншого боку призводить до нерівномірного розподілу напружень по перерізу елемента, концентрації арматури.

Армування елементів каркасом значно ефективніше, оскільки таким способом забезпечують більш рівномірний розподіл напружень по перерізу і значно зменшують витрати металу, однак існуючими методами занурити каркас на потрібну глибину неможливо.

Застосування розробленої методики армування ґрунтоцементних елементів дозволить виконувати їх армування просторовим каркасом на значну глибину, що, у свою чергу, значно розширить сферу їх застосування при підсиленні основ, складених слабкими ґрунтами.

Список літератури

1. Зоценко М. Л. та ін. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти* : підручник для студентів вищих навчальних закладів / за ред. М. Л. Зоценка. Полтава : ПНТУ, 2004. 562 с.
2. Shibazaki M. State of practice of jet grouting. *Geotechnical Special Publication. Grouting and Ground Treatment*. 2003. Vol. 1. P. 198–217. DOI: [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)7](https://doi.org/10.1061/40663(2003)7).
3. Njock P. G. A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y. H. A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11, № 20. P. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>.
4. Tornaghi R., Pettinaroli A. Design control criteria of jet grouting treatment. *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place* (Paris, France). 2004.
5. Croce P., Flora A., Modoni G. *Jet grouting: technology, design and control*. New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 305 с.
6. Зуєвська Н. В., Шайдецька Л. В., Губашова В. Є. Перспективи застосування струменево-цементацийного закріплення ґрунтових основ. *Геоінженерія*. 2020. № 3. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.3.2020.219322>.
7. Зоценко М. Л. Ґрунтоцемент – конструктивний і гідроізоляційний матеріал при будівництві підземних споруд. *Будівельні конструкції*. 2016. Вип. 83 (2). С. 296–316. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83\(2\)_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83(2)_37).
8. Кірічек Ю. А., Комісаров Г. В. Конструкції з ґрунтоцементу для зведення фундаментів будівель і споруд. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 3. С. 42–50. DOI: 10.30838/J.BBPSACEA.2312.040719.42.462.
9. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом : монографія*. Харків : Друкарня Мадрид, 2016. 94 с.
10. Zotsenko N., Vynnykov Yu., Zotsenko V. Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use*. Oradea : Oradea University Press, 2015. P. 192–253.
11. Блашук Н. В., Маєвська І. В., Гончарук М. С. Використання золи виносення у складі ґрунтоцементу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. 2020. № 2. С. 51–65. DOI: 10.31649/2311-1429-2020-2-51-65.
12. Михайловська О. В. Технологія влаштування ґрунтоцементних блоків з добавкою золи. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2022. № 31. С. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-02>.
13. Zotsenko M., Mykhailovska O., Shirinzade I., Lartseva I. Influence of fly ash additives on strength characteristics of soil–cement as a material for waste storage construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. P. 457–464.
14. Маєвська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М. С. Визначення впливу добавок золи виносення на властивості ґрунтоцементу. *Інноваційні технології в будівництві : міжнар. наук.-техн. конф.* (Вінниця, 2018). Вінниця : ВНТУ, 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020>.
15. Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу. *Зб. наук. пр. (Галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34). С. 171–177.
16. Marchenko V., Nesterenko T. Influence of vibration time during preparation soil-cement piles on their bearing capacity. *Conference reports materials «Problems of energy saving and nature use 2013»*. Budapest, 2014. P. 78–83.
17. Novytskyi O. Soil-cement piles fiber reinforced. *Theory and Building Practice*. 2021. Vol. 3, № 1. P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.113>.
18. Bondar V., Bondar L., Petrash O. Reinforcement corrosion characteristics with periodical profile. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, № 3.2. P. 575–579.
19. Петраш Р. В., Петраш О. В., Кальченко Т. С. Технологічні особливості процесу армування ґрунтоцементних палей. *Проблеми сучасного будівництва : матеріали Всеукр. конф. молодих учених і аспірантів* (Полтава, 17 груд. 2014 р.). Полтава : ПолтНТУ, 2014. С. 263.

References

1. Blashchuk, N. V., Maievskaya, I. V., & Honcharuk, M. S. (2020). Use of fly ash in soil–cement composition. *Modern Technologies, Materials and Structures in Construction*, 2, 51–65. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65> [in Ukrainian].
2. Bondar, V., Bondar, L., & Petrash, O. (2018). Reinforcement corrosion characteristics with periodical profile. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 575–579.
3. Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet grouting: Technology, design and control*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
4. Kirichek, Yu. A., & Komissarov, H. V. (2019). Structures made of soil–cement for construction of building foundations. *Bulletin of Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 3, 42–50. <https://doi.org/10.30838/J.BBPSACEA.2312.040719.42.462> [in Ukrainian].

5. Marchenko, V., & Nesterenko, T. (2014). Influence of vibration time during preparation soil–cement piles on their bearing capacity. In *Conference reports materials “Problems of energy saving and nature use 2013”* (p. 78–83). Budapest.
6. Maievska, I. V., Ocheretnyi, V. P., & Honcharuk, M. S. (2018). Determination of the influence of fly ash additives on the properties of soil–cement. In *Innovative technologies in construction: International scientific-technical conference* (Vinnytsia, Ukraine). Vinnytsia: VNTU. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020> [in Ukrainian].
7. Mykhailovska, O. V. (2022). Technology of arranging soil–cement blocks with fly ash additives. *Bulletin of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, 31, 14–18. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-02> [in Ukrainian].
8. Njock, P. G. A., Chen, J., Modoni, G., Arulrajah, A., & Kim, Y. H. (2018). A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), 1–31. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>
9. Novitskyi, O. P. (2012). Influence of plasticizing additives on soil–cement strength. *Collected Scientific Works (Industry Engineering, Construction)*, 4(34), 171–177 [in Ukrainian].
10. Novytskyi, O. (2021). Soil–cement piles fiber reinforced. *Theory and Building Practice*, 3(1), 113–119. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.113>
11. Petrash, R. V., Petrash, O. V., & Kalchenko, T. S. (2014, December 17). Technological features of the soil–cement pile reinforcement process. In *Problems of modern construction: Proceedings of the All-Ukrainian Conference of Young Scientists and Postgraduates* (p. 263). Poltava: PoltNTU [in Ukrainian].
12. Shibazaki, M. (2003). State of practice of jet grouting. *Geotechnical Special Publication. Grouting and Ground Treatment*, 1, 198–217. [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)7](https://doi.org/10.1061/40663(2003)7)
13. Tornaghi, R., & Pettinaroli, A. (2004). Design control criteria of jet grouting treatment. In *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place* (Paris, France).
14. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Bored soil–cement piles manufactured by boring–mixing method: Monograph*. Kharkiv: Drukarnia Madrid [in Ukrainian].
15. Zotsenko, M., Mykhailovska, O., Shirinzade, I., & Lartseva, I. (2022). Influence of fly ash additives on strength characteristics of soil–cement as a material for waste storage construction. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 457–464). Springer.
16. Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V. (2015). Soil–cement piles by boring–mixing technology. In *Energy, energy saving and rational nature use* (pp. 192–253). Oradea: Oradea University Press.
17. Zotsenko, M. L. (2016). Soil–cement as a structural and waterproofing material in underground construction. *Building Constructions*, 83(2), 296–316. [nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83\(2\)_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83(2)_37) [in Ukrainian].
18. Zotsenko, M. L. (Ed.). (2004). *Engineering geology. Soil mechanics, foundations and foundations: Textbook for students of higher educational institutions*. Poltava: PNTU [in Ukrainian].
19. Zuievska, N. V., Shaidetska, L. V., & Hubashova, V. Ye. (2020). Prospects for the use of jet–cement soil strengthening. *Geoengineering*, 3, 13–19. doi.org/10.20535/2707-2096.3.2020.219322 [in Ukrainian].

Serhii Bida, Assoc. Prof., PhD tech. sci, Oleksandr Petrash, Assoc. Prof., PhD tech. sci,

Ruslan Petrash, Assoc. Prof., PhD tech. sci

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Reinforcement Efficiency of Soil-Cement Elements Manufactured by Deep Soil Mixing Technology

The construction of buildings with significant loads on the foundation and the use of areas of loose soils for construction requires builders to take measures to increase the bearing capacity of the foundation. In recent years, considerable attention has been paid to the development of technologies for strengthening the foundation soils, which ultimately allows the use of shallow foundations. One of these areas is the arrangement of soil-cement elements using various technologies. The article focuses on increasing the bearing capacity of soil-cement elements manufactured using deep soilmixing technology.

The construction of soil-cement elements is possible using various technologies, but the deep soil mixing technology has a number of advantages, including high mobility of the equipment complex, the ability to work in constrained conditions, easy variation of soil-cement elements parameters by using replaceable equipment, minimal impact on the environment and workers in terms of occupational safety, independence of the technological process from external factors, the ability to constantly monitor material consumption This method of producing soil-cement elements by mixing without removing the soil makes it possible to perform work without using casing or other measures to ensure the stability of a borehole.

However, as foundation construction practice has shown, the main disadvantage of soil-cement elements is their relatively low material strength. Increasing the strength of soil-cement elements is possible in various ways - by adding more cement, plasticizing or other additives, fly ash, vibration, reinforcement with synthetic materials, etc. However, the most effective way to increase the bearing capacity is to reinforce them with rolled profiles or spatial frames. Reinforcement with frames is more effective, but immersion of the frame in soil cement is problematic, so the paper proposes a method of immersion of the frame that allows increasing the depth of reinforcement of soil cement elements.

ground improvement, soil-cement, deep soil mixing technology, reinforcement

Одержано (Received) 26.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 13.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025