МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 691.54:625.12.067/.068

О. Л. ТЮТЬКІН[1*], О. В. ГРОМОВА[2]

[1*]Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758
[2]Кафедра «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали» Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, ел. пошта o.i.hromova@ust.edu.ua, ORCID 000-0002-5149-4165

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СКЛАДОВИХ КОМПОНЕНТІВ І МЕТОДУ ОТРИМАННЯ ҐРУНТОЦЕМЕНТНОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ ПІДСИЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Мета. Обґрунтування вибору складових компонентів і методів отримання ґрунтоцементного елементу для підсилення земляного полотна в Україні з урахуванням європейського досвіду. **Методика.** Проаналізовано розроблені і впроваджені в Україні і Європейському Союзі концепції підсилення земляного полотна за допомогою горизонтального підсилення (геосинтетичні матеріали), вертикального підсилення (вертикальні палі або мікропалі) та комбінації геосинтетичних матеріалів з палями. Розглянуті переваги і недоліки фізико-хімічних і механічних методів підсилення. **Результати.** Проведено обґрунтування матеріалу та складових компонентів ґрунтоцементних елементів і методів їх створення для підсилення земляного полотна залізниць. Одним з ефективних напрямків отримання вертикальних армуючих елементів і зниження вартості робіт з підсилення і укріплення земляного полотна є використання суміші ґрунту з додаванням цементу, отриманих за бурозмішувальною технологією. Для модифікування структури ґрунтоцементу і мінімізації витрати цементу, пропонується застосування в якості армуючих компонентів фіброві волокна, хімічні добавки і тонкодисперсні відходи промисловості у вигляді золи чи меленого шлаку. Проведено дослідження щодо встановлення базових параметрів складу ґрунтоцементу для подальшого модифікування структури елементу під конкретні ситуаційні умови земляного полотна. **Наукова новизна.** Наукову новизну роботи складають результати обґрунтування напрямів підсилення земляного полотна вертикальними ґрунтоцементними елементами при різному напружено-деформованому стані ґрунтових основ і складу вертикальних елементів в Україні та Європейському Союзі. **Практична значимість.** Практична значимість викладеного дослідження полягає в тому, що вибираючи той або інший метод підсилення ґрунтових основ, підбирається відповідний склад матеріалу підсилення, тобто може бути визначена його ефективність та раціональність під час впровадження в конкретних умовах експлуатації залізниці для земляного полотна, яке потребує підсилення.

Ключові слова: земляне полотно; ґрунтові основи; підсилення; ґрунтоцемент; ґрунтоцементні елементи; бурозмішувальна технологія

Вступ

Перспективним розвитком українських залізниць являється перевлаштування під суміщену, а потім перехід на європейську колію. Суміщення колій із значеннями 1520 і 1435 мм призведе до зміни напружено-деформованого стану земляного полотна, що при недостатньо зміцненій основі може викликати деформації і руйнування верхньої будови колії, що призведе до небезпеки експлуатації.

Перевлаштування українських залізниць під суміщену колію буде проходити поступово і окремими ділянками. Оскільки створення нового земляного полотна із шириною колії 1435 мм на всій протяжності української залізниці є неможливим з економічної та технічної точки зору в наближеному майбутньому, то основним із засобів перевлаштування вже існуючої конструкції колії, що тривалий час експлуатувалася і набула фізичного зношення до підвищених експлуатаційних вимог під час впровадження європейської колії на території України, являється підсилення шляхом уведення елементів армування з метою приведення ґрунтової основи до зміцненого і однорідного стану з метою попередження можливого розвитку надмірних деформацій і пошкоджень.

Creative Commons Attribution 4.0 International © О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023

ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)
Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2023, № 24

Відомо, що зміцнення (стабілізація) ґрунту є одним із найскладніших та трудомістких процесів у всій будівельній індустрії як в промисловому і цивільному будівництві, так і в дорожньому будівництві, як при реконструкції і підсиленні ґрунту під фундаментами споруд, так в при влаштуванні підсилення земляного полотна під залізницю.

Мета

Метою наукової статті є обґрунтування вибору складових компонентів матеріалів і методів підсилення ґрунтоцементними елементами земляного полотна в Україні з урахуванням європейського досвіду. В роботі на базі досвіду в області підсилення і підвищення стійкості ґрунтових основ за допомогою ґрунтоцементних елементів, як найбільш екологічного та економічного армуючого елементу для ґрунту, а також на основі аналізу відомих матеріалів і технологій для підсилення, доводиться гіпотеза про найбільшу ефективність вертикальних ґрунтоцементних елементів підсилення отриманих за бурозмішувальною технологією у порівнянні з іншими варіантами у випадку перевлаштування під суміщену колію (1520/1435 мм), встановлення вимог до складових і до самого підсилюваного матеріалу.

Методика

Підсилення земляного полотна українських залізниць при улаштування основної площадки земляного полотна, а також при виконанні капітального ремонту та модернізації колії переважно вирішується впровадженням матеріалів і методів горизонтального підсилення, що регламентується нормативним документом (ЦП-0204, 2009) (табл. 1).

За європейськими стандартами на залізницях Європейського Союзу впроваджуються і набули поширення такі напрямки підсилення земляного полотна: горизонтальне підсилення – геосинтетичними матеріалами (Fischer, 2022); вертикальне підсилення – вертикальними армуючи ми палями або мікропалями (Pshinko, Petrenko, Tiutkin, et al., 2019; Петренко, Андрєєв, & Харченко, 2021), а також комбіновані способи підсилення – комбінації геосинтетичних матеріалів з палями (Alsirawan, 2021).

Ці види підсилення земляного полотна суттєво відрізняються один від одного за технічним, технологічним і матеріальним впровадженням, потребують обґрунтування і підтвердження ефективності в конкретних ситуаціях в умовах реконструкції українських залізниць.

В роботі (Петренко, Тютькін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019) детально розглянута спроба розділення параметрів підсилення на позитивні (зменшення горизонтальних та вертикальних деформацій) та негативні (параметри технології) впливи, тобто проведено ранжування параметрів. Це дає можливість обрати ефективний спосіб і підібрати матеріал підсилення.

Проведемо аналіз існуючих способів і матеріалів для підсилення при вирішенні задачі підсилення земельного полотна під впровадження суміщеної або єврколії в Україні. Під геосинтетичними матеріалами розуміють будівельні матеріали, які, виконують свої функції в контакті з ґрунтом. Геосинтетичні матеріали, які використовуються в якості захисту укосів і схилів від впливу ерозії і дозволяють запобігти зрушення верхнього шару ґрунту. В таблиці 1 наведені відомі способи і геосинтетичні матеріали для влаштування горизонтального підсилення.

Основні функції для кожного типу геосинтетичних матеріалів наведені в таблиці 2.

Область застосування горизонтального підсилення геосинтетичними матеріалами обмежуються, оскільки ці схеми мінімальним чином впливають на складову переважно вертикального деформування земляного полотна, при вирішенні поставленої задачі реконструкції або зведення європейської колії.

Горизонтальні елементи підсилення із геосинтетичних матеріалів мають переважне застосування з метою створення проміжного шару для розділення щебеневого баласту та матеріалу земляного полотна, і сприймають навантаження вздовж земляного полотна на осьовий розтяг.

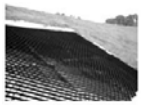
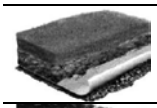
Також, навіть в комбінації геосинтетичних матеріалів з палями георешітка, що розташована на оголовках паль, лише розділяє баласт, палі і ґрунт земляного полотна, незначно впливаючи на позитивний розподіл горизонтальних переміщень (Петренко, Гузченко, Тютькін, & Алхдур, 2010). Найбільш раціональним являється заанкерений варіант підсилення земляного полотна, що застосовується в комбінації з шаром із збільшеними деформаційними характеристиками, наприклад з відпрацьованим баластовим щебенем.

В таблиці 3 розглядаються альтернативні фізико-хімічні методи підсилення ґрунтів.

© О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023 Creative Commons Attribution 4.0 International

Таблиця 1

Характеристика матеріалів і область застосування горизонтального підсилення земляного полотна

Матеріал	Найменування матеріалу	Область застосування
	Георешітки	зміцнення схилів доріг; будова підпірних стін різного призначення; армування неоднорідних ґрунтів; укріплення русел річок і прибережної зони водойм
	Геосітки	зміцнення і підвищення загальної стійкості крутих схилів; поділ різних типів ґрунтів при зведенні насипу; підвищення несучої здатності слабкої основи; скорочення термінів консолідації основи; підвищення стійкості ґрунтових конструкцій на зрушення;
	Геотекстиль	дорожнє будівництво; армування укосів; будівництво тунелів; гідротехнічні споруди; виробництво гідродренажних систем
	Геомати	зміцнення укосів, кюветів насипів і виїмок; озеленення укосів; захист зсувних схилів ярів і споруд на ділянках зсувів
	Геомембрани	водотривкі греблі; водойми і резервуари; водопропускні канали
	Геокомпозити	горизонтальний і вертикальний дренаж будівельних конструкцій; армування схилів, доріг, підпірних стінок; стабілізація ґрунтів

Таблиця 2

Основні функції геосинтетичних матеріалів

Тип геосинтетичного матеріалу	функція поділу	функція арматури	функція дренажу	функція утримуючої конструкції
Геотекстиль	+	+	+	-
Георешітки	+	+	+	-
Геосітки	+	+	+	-
Геомембрани	-	-	-	+
Геокомпозити	+	+	+	+

Силікатизація, електоросилікатизація, смолизація, бітумізація, термічне закріплення являються досить агресивними методами закріплення і підсилення ґрунтової основи. Найбільш екологічним і менш трудомістким являється використання підсилюючих складів на основі цементу. При змішуванні підлеглих ґрунтів із цементом, вапном, гіпсом, шлаками, золами, відсівами, та іншими дисперсними наповнювачами і з модифікацією складу уведенням хімічних добавок дає можливість отримати новий ефективний, підсилюючий неоднорідний і пористий ґрунт, матеріал – ґрунтоцемент, який був відомий давно і останнім часом досить широко застосовується для підготовки основ під зведення фундаментів, а також для вирішення інших геотехнічних завдань.

На сьогоднішній день інтенсивно застосовується механічний спосіб підсилення ґрунтової основи, який полягає в ущільненні ґрунту. Таке ущільнення виконують в поверхневих шарах, глибинним або у вигляді попереднього обтиснення ґрунту:

а) поверхневе ущільнення зволоженого ґрунту виконують трамбівками та трамбуючими машинами, котками, вібраторами;

б) глибинне ущільнення полягає у влаштуванні ґрунтових, шлакових, ґрунтоцементних чи вапняних паль;

в) глибинне віброущільнення з попереднім замочуванням ґрунту з підводними вибухами або глибинне гідроущільнення вибухами;

г) обтиснення ґрунту пониженням ґрунтових вод шляхом улаштування водозниження, дренажів або ущільнення зовнішнім привантаженням.

Оскільки застосування механічного способу може супроводжуватись інтенсивними динамічними впливами як на сам об’єкт, так і на прилеглу забудову, його застосування значно обмежується або і не допускається в деяких випадках.

Creative Commons Attribution 4.0 International © О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023

Таблиця 3

Основні фізико-хімічні методи підсилення ґрунтів земляного полотна

№ з/п	Метод підсилення	Суть методу	Застосування методу і очікуваний результат		
			ґрунти	Коефіцієнт фільтрації	Очікуване підвищення міцності, МПа
1	Силікатизація однорозчинна	Нагнітання силікату натрію	леси	2…0,1	0,6…0,8
		Нагнітання силікату натрію із отверджувачем	дрібні пилуваті піски	5…0,5	0,4…0,5
	дворозчинна	Почергове нагнітання силікату натрію і хлористого кальцію	піски	80…2	1,5…3,5
2	Електоросилікатизація	Почергове нагнітання силікату натрію і хлористого кальцію при дії постійного електричного струму	глини, суглинки, піски	9…0,01	0,4…0,8
3	Цементація	Нагнітання цементної суспензії	крупнозернисті піски	80	1,0…4,0
4	Смолизація, бітумизація	Нагнітання розчину смоли із отверджувачем	піски	5…0,5	1,5…2.2
5	Глинизація	Нагнітання глинистої суспензії	леси	2…0,1	0,4…0,5
6	Термічне закріплення	Згорянням палива в свердловині в ґрунті	леси, суглинки, чорнозем	менше 0,1	10,0…40,0
7	Пониження рівня ґрунтових вод	Влаштування дренажу навколо місця будівництва	будь-які	–	підвищення на 10…20 %

До конструктивних методів відносяться: влаштування шпунтової огорожі; армування металевими каркасами ґрунту; створення бокового привантаження; влаштування протифільтраційних завіс. Такі методи являються найбільш трудомісткими і їх раціонально застосовувати при влаштуванні підсилення основ під фундаменти при зведені будівель, складному рельєфі і високому рівні ґрунтових вод.

Підсилення земляного полотна малодеформативним шаром, є також недостатньо ефективне у випадку зменшення вертикальних деформацій, проте має позитивний ефект саме збільшення деформаційних властивостей шару.

Таким чином, напрям підсилення горизонтальними елементами рекомендується у випадку підсилення ґрунтових основ під суміщену залізничну колію має замінюватися методами підсилення вертикальними елементами і, як альтернатива, що має переваги попередніх двох – третім напрямом підсилення комбінацією вертикальних і горизонтальних елементів, що переважно використовуються в практиці підсилення земляного полотна в Європейському Союзі.

Для реалізація напряму підсилення вертикальним елементами в Україні під час перевлаштування залізниці під суміщену колію потрібно провести теоретико-практичне обґрунтування саме для впровадження для підсилення ґрунтових основ залізниці.

В дослідженні за основну гіпотезу, що пропонується для здійснення зміцнення земляного полотна – довести ефективність вертикальних ґрунтоцементних елементів підсилення отриманих за бурозмішувальною технологією при порівнянні з іншими варіантами у випадку перевлаштування під суміщену колію (1520 / 1435 мм).

Результати

Введення елементів армування у ґрунтову основу полягає у підтримці вже існуючої ґрунтової матриці. Підсилення земляного полотна розглядається як армування, тобто уведення до ущільненого ґрунту елементів з різним орієнтуванням (горизонтальним, вертикальним, похилим) матеріалу (геосинтетичні матеріали, цементно-піщаний розчин, ґрунтоцемент, щебінь, асфальт, комбіновані варіанти тощо), врахову-

© О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023 Creative Commons Attribution 4.0 International

ючи характер взаємодії (стиск, розтяг, перерозподіл розтягу і стиску).

Аналізуючи напружено-деформований стан системи «рухомий склад – залізнична колія», у випадку суміщення колій 1520 і 1435 мм, можна стверджувати, що максимальне зниження вертикального навантаження можливе лише під час застосування вертикальних ґрунтоцементних елементів. Розглянуті варіанти підсилення горизонтальними елементами являються не ефективними в поставлених в меті умовах тому, що їх орієнтування в земляному полотні є перпендикулярним дії навантаження від рухомого складу.

Напрям підсилення, що базується на уведенні до ґрунтової основи земляного полотна вертикальних елементів, в Україні розроблений теоретично і успішно впроваджений практично, але на об’єктах промислового та цивільного будівництва, під час підсилення основ і фундаментів.

Одним із перспективних напрямків отримання вертикальних армуючих елементів і зниження вартості земляних робіт при підсиленні і укріпленні земляного полотна є використання у якості матеріалу ґрунтів, які залягають в основі під залізничним полотном і цементу для зв’язування і зміцнення ґрунту.

В світовій і вітчизняній практиці набули поширення два методи створення верткальних ґрунтоцементних елементів для закріплення і підсилення ґрунту це бурозмішувальний метод, струменево-змішувальна цементація і метод струменевої цементації (Зоценко, 2013). Для улаштування елементів за першим методом використовують струменевий монітор, із форсунок якого виходить струмінь цементного розчину під тиском до 70 МПа.

Сутність другого методу полягає в механічному руйнуванні і перемішуванні ґрунту з цементом, який подається у вигляді цементно-водної суспензії (рис. 1). За допомогою бурового обладнання виконують розпушування ґрунту у масиві. Одночасно у розпушений ґрунт нагнітається цементна суспензія та відбувається перемішування й ущільнення ґрунтоцементної суміші без виймання ґрунту на поверхню.

Після затужавіння ґрунтоцементної суміші утворюється міцний ґрунтоцементний елемент (паля) або група елементів для підсилення або зміцнення певної ділянки ґрунтової основи (рис. 2), які не розмокають, а підвищують міцність і щільність у вологому середовищі.

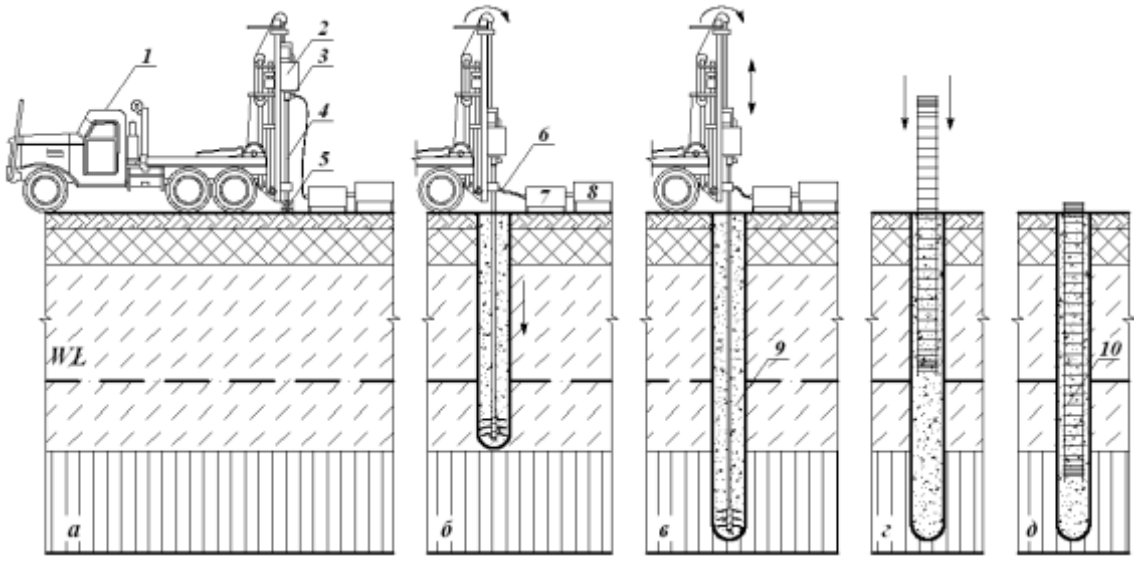


Рис. 1. Схема виготовлення ґрунтоцементних паль за бурозмішувальною технологією:
а – бурове обладнання; б – розпушування ґрунту з нагнітанням водоцементної суспензії;
в – перемішування суміші; г – встановлення арматурного каркасу; д – загальний вигляд ґрунтоцементної палі;
1 – автомобіль із буровим станком; 2 – силовий привід; 3 – вертлюг; 4 – бурова труба; 5 – ріжучий інструмент;
6 – напірний рукав для подачі водоцементного розчину; 7 – буровий насос; 8 – розчинозмішувач;
9 – ґрунтоцементний елемент; 10 – готова ґрунтоцементна паля

Creative Commons Attribution 4.0 International © О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023

ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)
Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2023, № 24

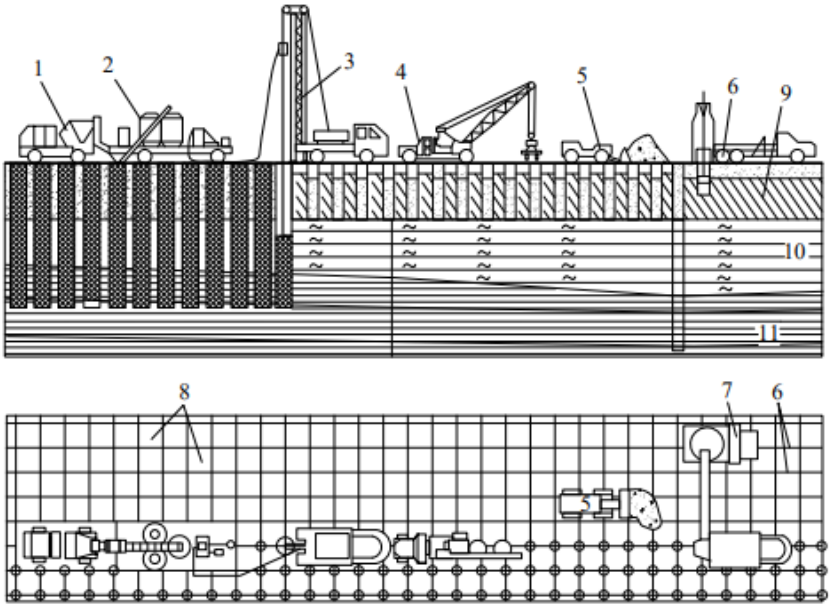


Рис. 2. Зміцнення ґрунтової основи бурозмішувальним способом:
1 – авторозчиновіз або 2 – пересувний розчинонасосний вузол; 3 і 6 – бурова установка; 4 – кран автомобільний;
5 – фронтальний навантажувач; 7 – автосамоскид; 8 – розпланувальна сітка для ґрунтоцементних паль;
9 – перекривний шар; 10 – ґрунт; 11 – щільний ґрунт

Ґрунтоцементні елементи, що виготовляються за бурозмішувальною технологією, мають звичайно діаметр 200…300 мм і довжину від 2,0 до 10,0 м (нижче дна котловану). Такі параметри встановлюються розрахунком в залежності від напружено-деформованого стану ґрунту, морфології ґрунту і параметрів буро змішувального обладнання.

Для вирішення задачі створення ґрунтоцементного елементу із заданими експлуатаційними властивостями необхідно сформувати комплекс вимог до фізико-механічних властивостей ґрунтоцементу для його ефективного застосування при підсиленні земляного полотна. На основі встановлених вимог виконується розробка рецептур цементних розчинів, що дозволяють максимально ефективно реалізовувати технологію підсилення земляного полотна.

На механічні властивості ґрунтоцементу, який виготовляється безпосередньо в масиві ґрунту, впливає склад ґрунтів, вміст цементу, водоцементне відношення цементної суспензії, вологість ґрунту, вміст водорозчинних солей, вміст добавок тощо. До ґрунтоцементу як армуючого елементу в структурі ґрунту ставляться наступні вимоги: 1) достатня механічна міцність; 2) підвищений модуль деформації; 3) висока щільність.

Тому для забезпечення комплексу механічних і експлуатаційних вимог важливу роль відіграє склад ґрунтоцементу. Основними показниками складу прийняті наступні:

– вміст цементу (відсоток вмісту цементу від маси скелету ґрунту в суміші);

– водоцементне відношення.

У випадку модифікування структури ґрунтоцементу з метою покращення технологічних і механічних властивостей:

– вміст мінеральної домішки (меленого доменного шлаку або золи);

– вміст хімічного модифікатора (суперпластифікатора С-3);

– вміст крупнодисперсної домішки (відсіву каменедроблення, піску).

Проведемо обґрунтування вибору компоненти ґрунтоцементу і їх вплив на показники складу і забезпечення комплексу вимог до ґрунтоцементу і технологічності суміші при застосуванні бурозмішувальної технології.

Основним компонентами ґрунтоцементу є ґрунт, в’яжуча речовина і додаткові компоненти. Ґрунт являється як базисом для створення армуючих елементів, як структурним, так і складовим компонентом ґрунтоцементної суміші. Характеристики ґрунтових умов дуже різноманітні, але придатність ґрунтів або очіку-

© О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023 Creative Commons Attribution 4.0 International

ваний результат можна оцінювати за вимогами встановленими ВСН 40-88, 1998.

При влаштуванні ґрунтоцементних елементів пилувато-глинисті ґрунти повинні задовольняти наступним вимогам (гранулометричний склад та інші показники приводять у відповідність до вимог):

– вміст часток розміром менше 0,005 мм – 5…30 %, розміром 0,005…0,05 – 15…90 %;

– число пластичності I_p = 1…15 %;

– водневий показник ґрунту pH > 6;

– вміст легко- та середньорозчинних солей ≤3 %, при сульфатному засоленні – не більше 2 %;

– відносний вміст органічних домішок – до 0,06.

Ґрунти, що не відповідають вимогам за гранулометричним складом та пластичністю, можуть бути покращені шляхом введення піску або глини, а для зниження кислотності – введенням вапна (1…2 %).

Як основа для розробки рецептур ґрунтоцементу були обрані декілька типів ґрунту, поширених на території м. Дніпро та Дніпропетровської області. Найбільш технологічними для виготовлення ґрунтоцементну бурозмішувальним методом являються лесові і лесовані ґрунти. Такий тип ґрунтів переважає в ґрунтових основах Дніпропетровської області. Для отримання достовірних даних рекомендується перед влаштуванням ґрунтоцементних елементів провести попередньо заміси на ґрунтах плануємого влаштування ґрунтоцементних паль.

Найбільш дорогим і другим за вмістом компонентом ґрунтоцементу є в’яжуча речовина. В якості в’яжучої речовини для цементної суспензії застосовують портландцемент, пуцолановий або шлакопортландцемент. При підвищеній агресивності ґрунтових вод використовують сульфатостійкий портландцемент. Для зменшення фільтрації використовують тампонажні цементи, а також швидкотужавіючі цементи.

Для зміцнення і закріплення ґрунтів бурозмішувальним методом витрата цементу становить від 160 до 250 кг цементу на 1 м^3 розробленого ґрунту. Ґрунт попередньо механічно розпушують і додають цемент у вигляді цементної суспензії із водоцементним відношенням в межах 0,5…0,6.

Якість ґрунтоцементного елементу оцінюють випробуванням підготовлених або відібраних з масиву елементу на міцність при стиску через 28 діб вологого зберігання (рис. 3).

Рис. 3. Дослідні зразки з ґрунтоцементу

Для покращення проникності цементного розчину у пористу структуру ґрунту рекомендується проводити попередню активацію цементу. Цей процес також сприяє підвищенню швидкості тужавіння ґрунтоцементу, зменшення седиментації суміші. Суміші на активованому цементі мають високу проникність і текучість, створюють міцний і водонепроникний ґрунтоцементний елемент. Під час механічної диспергації відбувається подрібнення цементу й збільшенні часток розміром менше 0,02 мм, що дозволяє при інтенсивній механічній дії у спеціальних млинах отримати водні розчини, що набувають властивостей колоїду.

Для економії цементу рекомендується додавати, як часткову заміну цементу, різноманітні мінеральні добавки і наповнювачі. З цією метою використовують домішки золи з відходів теплових електростанцій або мелений шлак, введення яких одночасно сприяє підвищенню водонепроникності і щільності ґрунтоцементу. При введенні домішок піску та відсіву від каменеподрібнення або хвостів у кількості до 20 % відбувається зростання міцності та модулю деформації до 20…40 %.

Ґрунтофібробетон є різновидом дисперсно-армованого залізобетону і виготовляється з ґрунтоцементного або піщано-цементного розчину, в якому в якості армую чого компоненту рекомендується використовувати сталеву, полімерну або базальтову фібру, що рівномірно розподіляється по об’єму суміші.

Creative Commons Attribution 4.0 International © О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023

Спільність роботи ґрунтоцементної матриці і волокна (фібр) забезпечується за рахунок зчеплення по їх поверхні і анкерування фібри за рахунок періодичного профілю та її кривизни в поздовжньому і поперечному напрямку (Fan, Wang & Qian, 2018). При цьому застосування фібри сприяє підвищенню тріщиностійкості, ударної в'язкості, в'язкості руйнування, зносостійкості, морозостійкості, знижується усадка і повзучість, а також знижуються трудовитрати на арматурні роботі.

Сталефіброгрунтобетон залежно від орієнтації армуючих волокон поділяються на:

- армований сталевою або органічною або неорганічно фіброю, що нерівномірно розподілена за об'ємом елемента;
- комбіновано армований при застосуванні сталевої фібри у поєднанні орієнтованою у визначеному напрямку стрижневою або дротяною арматурою.

Застосування ґрунтофібробетона в якості підсилюючого елементу дозволяє або зовсім відмовитися від арматурного каркасу, або обмежитися його використанням у верхній частині палі для зв'язку з елементами ростверку.

Для створення ґрунтоцементних елементів із заданими фізико-механічними властивостями рекомендується застосувати комплекс домішок, що покращують технологічність суміші, збільшують її рухливість і зв'язність, знижують в'язкість і покращують однорідність, здатність до нагнітання, при цьому з'являється можливість регулювати строки тужавіння суміші застосуванням для прискорення тужавіння хлористого кальцію, соляної кислоти, рідинного скла, соди, а для сповільнення тужавлення гіпсу, слабкого розчину сірчаної кислоти, сірчанокислого заліза, технічної сахарози, а також підвищувати швидкість набору міцності ґрунтоцементної системи, зменшувати витрату цементу і води, тим самим зменшуючи пористість, забезпечувати фізико-хімічну сумісність компонентів для забезпечення заданих якостей, а також можливість підвищити або забезпечити комплекс необхідних спеціальних експлуатаційних властивостей, таких як електроізоляційні, антикорозійні, водонепроникні характеристики ґрунтоцементних елементів.

Дослідження фізико-механічних властивостей зразків ґрунтоцементного сталефібробетона виготовлених із застосуванням добавки С-3 у кількості 0,8 % від маси цементу показали збільшення міцності до 13,6 МПа, що є достатнім для палі діаметром 400 мм здатності сприйняти навантаження до 10,0…12,0 МПа. Збільшення міцності зразків, виготовлених із Модифікація складу ґрунтоцементу хімічними добавками дозволяє підвищити легкоукладальність, проникність і текучість ґрунтоцементної суміші в ґрунтовій основі, ступінь ущільненості і зміцнення модифікованої ґрунтоцементної композиції на 20…30 %.

Для визначення оптимальних (базових) параметрів складових компонентів ґрунтоцементних елементів підсилення проведені попередні дослідження для встановлення оптимального вмісту цементу, кількості добавки і мікронаповнювача.

Як зазначалось, за даними (Новицький, 2012) покращення механічних характеристик ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу уповільнюється після досягнення величини у 20 %. Для досліджень прийняті значення вмісту цементу: 10 %; 20 %; 30 %. Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу і добавки С-3 наведені на рис. 4.

Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку наведені в табл. 4 та на рис. 5.

Враховуючи незначний вплив вмісту шлаку (40 %) на приріст міцності та значне зниження пластичності суміші, для подальшого застосування, приймається вміст шлаку 20 % від маси цементу для ґрунтів 1 і 2, та вміст шлаку 0 % для ґрунту 3.

Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу та суперпластифікатора наведені в табл. 5.

Враховуючи незначний приріст пластичності та значний вплив на міцність, для подальших досліджень приймається вміст суперпластифікатора 0,3 % від маси цементу.

В результаті проведеного обґрунтування вибору складових компонентів і визначення параметрів базового складу розкривається можливості встановлення впливу інших складових компонентів на властивості обраних базових складів ґрунтоцементних елементів, що являється розвитком наступних етапів дослідження.

© О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023 Creative Commons Attribution 4.0 International

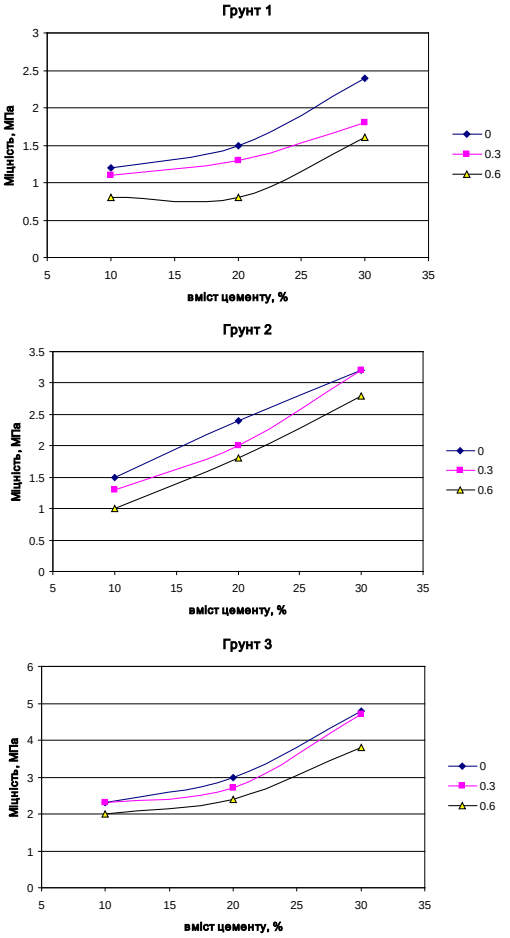


Рис. 4. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту цементу та суперпластифікатора С-3

Таблиця 4

Характеристики ґрунтоцементу залежно від шлаку

Вид ґрунту	I_p, %	Вміст цементу, %	Вміст шлаку, %	Значення характеристики	
				Міцність f, МПа 28 діб	Модуль деформації, E, МПа
Грунт 1	12	30	0	1,8	380
			20	2,9	440
			40	3,2	460
Грунт 2	9	20	0	2,8	380
			20	3,6	460
			40	4,0	450
Грунт 3	6	20	0	3,8	400
			20	4,2	440
			40	4,3	460

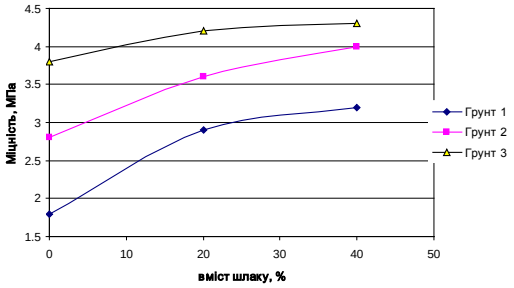


Рис. 5. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту шлаку

Таблиця 5

Характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу та С-3

Вид ґрунту	I_p, %	Вміст цементу, %	Вміст С-3, %	Значення характеристики	
				Міцність f, МПа 28 діб	Модуль деформації, Е, МПа
Ґрунт 1	12	10	0	1,21	230
			0,3	1,12	210
			0,6	0,75	170
		20	0	1,81	320
			0,3	1,72	290
			0,6	1,31	240
		30	0	2,5	410
			0,3	1,8	380
			0,6	1,64	320
Ґрунт 2	9	10	0	1,51	260
			0,3	1,32	230
			0,6	1,09	190
		20	0	3,0	400
			0,3	2,8	380
			0,6	2,6	320
		30	0	3,21	420
			0,3	3,1	420
			0,6	2,9	400
Ґрунт 3	6	10	0	2,3	300
			0,3	2,31	290
			0,6	2,1	260
		20	0	4,3	420
			0,3	3,9	400
			0,6	3,2	340
		30	0	4,8	480
			0,3	4,6	480
			0,6	3,8	460

Не викликає сумнівів, що вибір ефективного матеріалу і методу підсилення земляного полотна являється складною багатопараметричною задачею при підсиленні ґрунтових основ при перевлаштуванні українських залізниць під су-

Creative Commons Attribution 4.0 International © О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023

міщену або європейську колію. Однак, розглянуті матеріали і методи підсилення земляного полотна можна обґрунтувати, провівши аналіз за позитивними та негативними параметрами, які характеризують конкретні експлуатаційні умови розміщення в ґрунтовій основі елементів підсилення, це викликає необхідність провести додаткові дослідження і обґрунтовано обрати найбільш доцільний склад ґрунтоцементного елементу підсилення і найбільш оптимальні параметри технології його влаштування.

Наукова новизна і практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у виконаному обґрунтуванні напрямів підсилення земляного полотна вертикальними ґрунтоцементними елементами при різному напружено-деформованому стані ґрунтових основ і складу вертикальних елементів в ґрунтовій основі під залізницю, враховуючи сучасний досвід підсилення в Україні та Європейському Союзі.

Практична значимість викладеного дослідження полягає в тому, що застосовуючи той або інший метод підсилення ґрунтових основ вибирається відповідний склад матеріалу підсилення, тобто може бути визначена його ефективність та раціональність під час впровадження в конкретних умовах експлуатації залізниці, земляне полотно якої потребує підсилення або перевлаштування під суміщену або європейську колію.

Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проводились за підтримки гранту Національного фонду досліджень України під час реалізації проєкту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Висновки

Проаналізовано вітчизняний і європейський досвід підсилення земляного полотна горизонтальними, вертикальним елементами підсиленням і із застосуванням комбінованих методів, що надає можливість з'ясувати напрямки розвитку українських залізниць, які експлуатуються і потребують підсилення.

Результати проведеного аналізу свідчать про позитивний вплив на зменшення вертикальних деформацій вертикальних елементів підсилення.

Одним із ефективних напрямків отримання вертикальних армуючих елементів і зниження вартості при підсиленні і укріпленні земляного полотна є використання у якості матеріалу суміші ґрунту з додаванням цементу в кількості 20..30 % при водоцементному відношенні 0,6, при застосуванні бурозмішувальної технології. Для модифікування структури ґрунтоцементу і мінімізації витрати цементу, пропонується застосовувати в якості армуючих компонентів підсилення фіброві волокон, для отримання пластифікації – хімічних добавок до 0,3 % і для економії цементу – частки тонкодисперсних відходів промисловості у вигляді золи чи меленого шлаку до 20 %.

Розвиток цього наукового напрямку планується продовжити в проведенні ранжування матеріалів для підсилення вертикальними елементами. Тобто вибір матеріалу і його складу проводиться на рівні технологій із визначенням позитивних і негативних параметрів кожної з них.

Додатковим дослідженням є отримання оптимальних складів обраного матеріалу і проведення його модифікації з метою підсилення в залежності від умов роботи і складу ґрунту на конкретній ділянці, що дозволить отримати дані про ефективність влаштування вертикальних елементів в ґрунтовій основі земляного полотна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Alsirawan, R. (2021). Review of Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported (GRPS) embankments – parametric study and design methods. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(1), 36-59.

Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 791-797.

Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101.

Pshinko, O., Petrenko, V., Tiutkin, A., et al. (2019). Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles. *Transport Means 2019. Sustainability: Research and Solutions*, II, 820-828.

© О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023 Creative Commons Attribution 4.0 International

Зоценко, М. Л. (2013). Ґрунтоцементні палі, що виготовляються бурозмішувальним методом. *Галузеве машинобудування, будівництво,* 3 (38), 110-122.

Новицький, О. П. (2012). Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу. *Галузеве машинобудування, будівництво*, 4 (34), 171-177.

Петренко, В. Д., Андрєєв, В. С., & Харченко, В. В. (2021). Порівняльний аналіз технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 69-77.

Петренко, В. Д., Гузченко, В. Т., Тютькін, А. Л., & Алхдур, А. М. М. (2010). Результати аналізу параметрів експериментальних досліджень армування геотекстилем земляного полотна. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 34, 131-135.

Петренко, В. Д., Тютькін, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74.

ВСН 40-88 (1998). *Проектування і влаштування фундаментів із цементогрунту для малоповерхових сільських будинків*. Київ: Державний агропромисловий комітет.

ЦП-0204 (2009). *Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії*. Київ: Укрзалізниця. Головне управління колійного господарства.

O. L. TIUTKIN[1*], O. V. HROMOVA[2]

[1*]Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758
[2]Department «Architectural design, landscaping and building materials», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 304 73 33, e-mail, o.v.hromova@ust.edu.ua, 0000-0002-5149-4165

SUBSTANTIATING THE CONCEPTS OF COMPONENTS COMPOSITION AND METHOD OF OBTAINING SOIL-CEMENT ELEMENT FOR REINFORCEMENT OF EMBANKMENTS

Purpose. Substantiating of the choice of components of materials and methods of obtaining a soil-cement element for strengthening the ground bases in Ukraine, taking into account the European experience. **Methodology.** The concepts of embankment reinforcement developed and implemented in Ukraine and the European union using horizontal reinforcement (geosynthetic materials), vertical reinforcement (vertical piles or micropiles) and a combination of geosynthetic materials with piles are analyzed. Advantages and disadvantages of physic-chemical and mechanical strengthening methods are considered. **Findings.** The substantiation of the material and constituent components of soil-cement elements and methods of their creation for strengthening the embankment of railways was carried out. One of the effective directions for obtaining vertical reinforcing elements and reducing the cost of work on strengthening and strengthening the embankment is the use of a mixture of soil with the addition of cement, obtained by drilling mixing technology. To modify the structure of soil cement and minimize cement consumption, it is suggested to use fiber fibers, chemical additives and finely dispersed industrial waste in the form of ash or ground slag as reinforcing components. A study was conducted to establish the basic parameters of the soil-cement composition for further modification of the structure of the element under the specific situational conditions of the embankment. **Originality.** The originality of the work is that, for the first time, based on the strengthening experience, the justification of the directions of strengthening the ground bases with vertical soil-cement elements at different stress-deformation conditions of the soil foundations and the composition of vertical elements in Ukraine and the European union was performed. **Practical value.** The practical value of the presented research is that when choosing one or another method of strengthening soil bases, the appropriate composition of the strengthening material is selected, that is, its efficiency and rationality can be determined during implementation in the specific conditions of operation of the railway, the embankment of which needs to be strengthened or rearranged for a combined or European track.

Keywords: embankment; ground bases; strengthening; soil cement; soil-cement elements; drilling technology

Creative Commons Attribution 4.0 International © О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023

REFERENCES

Alsirawan, R. (2021). Review of Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported (GRPS) embankments – parametric study and design methods. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(1), 36-59. (in English)

Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 791-797. (in English)

Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101. (in English)

Pshinko, O., Petrenko, V., Tiutkin, A., et al. (2019). Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles. *Transport Means 2019. Sustainability: Research and Solutions*, II, 820-828. (in English)

Zotsenko, M. L. (2013). Gruntotsementni pali, shcho vyhotovliaiutsia burozmishuvalnym metodom. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 3 (38), 110-122. (in Ukrainian)

Novytskyi, O. P. (2012). Vplyv plastyfikuiuchykh dobavok na mitsnist gruntotsementu. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 4 (34), 171-177. (in Ukrainian)

Petrenko, V. D., Andrieiev, V. S., & Kharchenko, V. V. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnolohii vlashtuvannia mikropal pid chas pidsylennia slabkykh gruntovykh osnov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 69-77. (in Ukrainian)

Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., Tiutkin, A. L., & Alkhdur, A. M. M. (2010). Rezultaty analizu parametriv eksperymentalnykh doslidzhen armuvannia heotekstylem zemlianoho polotna. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 34, 131-135. (in Ukrainian)

Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianoho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnymy elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)

VSN 40-88 (1998). *Proektuvannia i vlashtuvannia fundamentiv iz tsementohruntu dlia malopoverkhovykh silskykh budynkiv*. Kyiv: Derzhavnyi ahropromyslovyi komitet. (in Ukrainian)

TsP-0204 (2009). *Pravyla ulashtuvannia osnovnoi ploshchadky zemlianoho polotna pry vykonanni kapitalnoho remontu ta modernizatsii kolii*. Kyiv: Ukrzaliznytsia. Holovne upravlinnia koliinoho hospodarstva. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 18.09.2023.
Прийнята до друку 15.11.2023.

© О. Л. Тютькін, О. В. Громова, 2023 Creative Commons Attribution 4.0 International