

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.12:[693.54:624.131-033.24]

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>2\*</sup>, В. І. КРИСАН<sup>3</sup>, В. І. КРИСАН<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> ТОВ НВО РЕМБУД, провул. Калинина, 23, оф. 7, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 236 03 67, ел. пошта krysan.v.i@ukr.net

<sup>4</sup> ТОВ ПАРИТЕТ, вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 232 05 17, ел. пошта krysan.v.i@ukr.net

### ВІДНОВЛЕННЯ МІЦНОСНИХ ТА ДЕФОРМАТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ТА ЙОГО ОСНОВИ АРМУВАННЯМ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

**Мета.** Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи, а також розробка способу, який можна використовувати як при будівництві нових, так і при ремонті старих колій. **Методика.** Армування ґрунтоцементними елементами виконується на основі технології закріплення слабких ґрунтів, при якій процес укріплення здійснюється при достатньо низькому тиску в 0,15...0,25 МПа, на відміну від струминної технології (до 60 МПа). При цьому руйнування ґрунту виконується спеціальним пристроєм (струминно-змішувальним долотом). Для обґрунтування ефективності технології були проведені досліді на зразках ґрунтоцементних елементів в стабілометрі (тривісний стиск при зразку 32 мм в діаметрі і 75 мм по висоті). При цьому визначалися міцнісні та деформаційні характеристики, включно вертикальне напруження руйнування, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя та модуль пружності. **Результати.** По результатах експериментальних досліджень для неконсолідовано-недренованого стиску в стабілометрі були побудовані паспорти міцності в координатах «тангенційні напруження – девіатор напружень» та графік залежності відносних деформацій від напружень. Отримано результати міцносних та деформативних параметрів ґрунтоцементних елементів для зразків зі змістом цементу 7, 23 та 37,5 %. Так, напруження руйнування досягає декілька сотень кілопаскалей, модуль пружності – приблизно 7...22 МПа, зчеплення – 10...221 МПа. **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні закономірностей міцносних (напруження руйнування при тривісному стиску, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя) та деформативних (модуль пружності) параметрів від змісту цементу в ґрунтоцементних елементах, призначених для армування земляного залізничного полотна та основи. **Практична значимість.** Обладнання для реалізації способу укріплення армуванням ґрунтоцементними елементами, маючи невелику вагу та габарити, дозволяє ефективно обурювати та ін'єктувати земляне полотно та основу під різними кутами.

**Ключові слова:** земляне полотно; основа; ґрунтоцементні елементи; міцності та деформативні характеристики; струминно-змішувальна технологія

#### Вступ

АТ «Укрзалізниця» має близько 19800 км залізничних колій, зношеність яких в цілому досягла 50 %, а повної реконструкції потребує 27 % колій всіх магістралей. Всього, наприклад до кінця 2018 року, ремонтні шляхові бригади повинні були виконати реконструкцію 260 км, капітальний ремонт 230 км, середній ремонт 870 км та комплексно-оздоровчий ремонт 520 км шляхів.

Одним з важливих критеріїв на залізничному транспорті є безпека під час руху та виконання всіх робіт, що забезпечують рух залізничного транспорту. Як відомо, залізнична колія включає в себе комплекс інженерних споруд, пристроїв і облаштувань, що розташовані в смузї відведення, призначений для забезпечення руху поїздів і складений з верхньої будови колії, земляного полотна, водовідвідних та штучних споруд та ґрунтової основи, що відповідає різним інженерно-геологічним умовам.

© В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін, В. І. Крисан, В. В. Крисан, 2019

Весь цей комплекс повинен забезпечувати виконання основної задачі ефективної роботи транспортної системи – високошвидкісне і безпечне перевезення вантажів та пасажирів. Одним з найважливіших елементів системи є земляне полотно та ґрунтова основа, характеристики яких забезпечують довговічність та експлуатаційну надійність всієї системи.

Оскільки значна частина аварій рухомого складу виникає за причин дефектів, деформацій та пошкоджень, що створюються на залізничній колії та земляному полотні, необхідно розробляти високоефективні способи їх укріплення чи підсилення, включно із основою земляного полотна.

Значні витрати часу, праці та фінансів потребують роботи по стабілізації основної площадки земляного полотна, оскільки воно повинно забезпечувати експлуатацію з мінімальними відмовами при проходженні сучасних та перспективних типів рухомого складу при максимальних швидкостях і розрахунковій вантажності залізниці, бути надійним на всій протяжності на ґрунтах всіх типів. Так, ремонтні роботи займають 27 % часу, що в грошовому еквіваленті становить близько 700 млн. грн.

Технологія улаштування земляного полотна практично не змінилась з XIX сторіччя. Як і тоді, зараз виконується механічне ущільнення ґрунтів як виїмок, так і насипів, улаштування захисного шару під баластною призмою. Виконати ущільнення ґрунту, як того вимагають нормативні документи, є дуже непростю справою. Не кожен ґрунт здатний до ущільнення, крім того необхідні і певні умови, щоб його виконати. Такими умовами є вологість ґрунту, товщина шару ущільнення, ущільнюючий тиск. І порушення кожного з цих параметрів може звести нанівець якість виконання робіт. А природні фактори, такі як атмосферні опади, повністю порушують графік виконання робіт, тому що перезволожений ґрунт слід підсушувати до тієї вологості, яка забезпечить необхідний коефіцієнт ущільнення.

Для підсилення земляного полотна використовуються різні типи геотекстилю, пінопласту та шлаків, а також габіони, які потребують значних витрат фінансів і праці. Нормативною документацією рекомендуються різні інженерні способи підсилення основи та захисту насипів. Це можуть бути дренажні конструкції, залізо-

бетонні укріплення, хімічне закріплення поверхневого шару.

Всі ремонтні роботи, такі як капітальний ремонт путі з використанням нових матеріалів, капітальний ремонт путі з старорічними матеріалами, посилений та звичайний середні ремонти, підйомочний ремонт, що передбачені регламентами для виконання, включають роботи по виправленню дефектів, що сталися при експлуатації. Велика частина робіт пов'язана з ліквідацією активного розвитку баластних заглиблень, баластних випорів, просадок, здимання. Часто при експлуатації стається видавлювання глинистих ґрунтів, виникають опливи, сповзання ухилів. Всі перераховані вище дефекти виникають із-за того, що ґрунти, які є основою шляху та саме земляне полотно, не мають достатньої міцності або втратили її під час експлуатації за різних причин.

Для виконання прогнозованих ремонтних робіт нормативною документацією передбачається створення або розвиток матеріальної бази, як відкриття ґрунтових, кам'яних та піщаних кар'єрів, що забезпечать необхідні матеріали для виконання вказаних робіт.

### Мета

Метою науково-дослідницької роботи є відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи, а також розробка способу, який можна використовувати як при будівництві нових, так і при ремонті старих колій.

### Методика

На сьогоднішній час вже достатньо випробуваною і введеною в нормативну документацію України є технологія армування ґрунтів вертикальними жорсткими елементами. За останні 40-50 років були розроблені варіанти технологій укріплення ґрунтів з різними фізико-механічними властивостями, основою яких є руйнуюча дія водяного променя (Jahiro, & Joshida, 1974; Kutzner, 1996; Croce, Flora, & Modoni, 2014).

Перший напрямок ґрунтувався на використанні спеціалізованих насосів, що забезпечували тиск в 400...1000 атм. В подальшому більшої уваги було приділено іншому напрямку, що дозволяв використовувати насоси з більш низь-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ким тиском, але високою витратою робочої рідини. Особливо інтенсивний розвиток й впровадження надана технологія отримала в 1970-80 роках в різних країнах (Jahiro, & Joshida, 1974; Mitchell, Willem, & Dimilllo, 1984; Kutzner, 1996; Maertens, & Maekelberg, 2001; Малинин, 2009; Croce, Flora, & Modoni, 2014), детальний опис історії розвитку зроблений в монографії І. І. Бройда (2004).

Сутність технології полягає у використанні енергії високо напірного цементного струменя або цементно-бентонітового розчину. Струмінь виходить із сопла монітору, що розташований в його нижній частині; їх кількість може складати 2...6 шт., а діаметр – 1,6...6 мм. Необхідно відмітити, що за кордоном технологія отримала назву «jet-grouting» – струменеві закріплення (цементация), поділяючись на три різновиди (Гинзбург, 1979).

Застосування цієї технології на даний час дозволяє створення не тільки ґрунтоцементних елементів, але й їх підсилення каркасами армування, які розміщуються в тілі елементу ще до часу його тужавіння та твердіння, що дозволяє значно підвищити загальну несучу здатність.

В першому різновиді технологія базується на попередньому розмиві ґрунту (ПРГ) і подальшому поданні цементного розчину під тиском 40...60 МПа (400...600 атм) і витратою його в кількості 60...150 л/хв. В другому різновиді також виконується ПРГ, цементний розчин подається під тиском 40...60 МПа (400...600 атм) і витратою його в кількості 150...250 л/хв. Окрім цього, по окремому каналу подається стиснуте повітря під тиском 8...12 МПа (80...120 атм) і витратою його в кількості 6...18 м<sup>3</sup>/год. В третьому різновиді ПРГ не виконується, а по окремому каналу, скрізь сопло подається вода під тиском 30...50 МПа (300...500 атм), а цементний розчин і стиснене повітря також окремими каналами подаються відповідно з тиском 4...6 МПа (40...60 атм) і 0,8...1,2 МПа (8...12 атм) та з витратою води – 70...100 л/хв., цементного розчину – 150...250 л/хв і стисненого повітря – 6...18 м<sup>3</sup>/год.

Перевага таких різновидів цієї технології полягає в тому, що при їх використанні в піщаних ґрунтах можна отримати колони діаметром 0,6...1,0 м (І-й варіант), 1,0...2,0 м (ІІ-й варіант) і 1,5...2,5 м (ІІІ-й варіант). В глинистих ґрунтах

наданий параметр буде мати менші значення: 0,5...1,0 м (І-й варіант), 1,0...1,5 м (ІІ-й варіант) і 1,0...2,0 м (ІІІ-й варіант).

При застосування струмінних технологій важливе значення має така фізико-механічна характеристика як міцність матеріалу ґрунтоцементних елементів. Міцність укріпленого ґрунту на стиск в МПа наведена в джерелах (Камбефор, 1971; Jahiro, & Joshida, 1974; Гинзбург, 1979) (табл. 1).

Таблиця 1

## Міцність укріпленого ґрунту на стиск, МПа

Тип ґрунту	Літературне джерело		
	Камбефор, 1971	Jahiro, & Joshida, 1974	Гинзбург, 1979
Торф	< 3,0	0,3	< 1,5
Глина	< 8,0	1,8...3,0	1,5...4,0
Суглинок	3,0...10	3,0...4,5	2,0...9,0
Супісок	5,0...14,0	3,0...4,5	2,0...9,0
Пісок	< 15,0	6,0...9,0	5,0...15,0
Гравій	< 20,0	10,0...30,0	5,0...15,0

Як видно з наданої таблиці, міцність ґрунтоцементу навіть для конкретного типу ґрунту змінюється в широких межах, що можна пояснити не тільки різними складом та хімічним станом ґрунтів, але й різним питомим змістом цементу.

Одним з найбільш важливих технологічних факторів при струмінній технології закріплення ґрунтів є раціональний вибір та використання розчинів для закріплення. Це зумовлено як специфікою способу, так і вимогами до закріплених ґрунтів при вирішенні різних будівельних задач. По-перше, розчини для закріплення повинні мати наступні якості, тобто володіти: 1) здібністю створення нових ґрунтоцементних структур із заданими фізико-механічними і фільтраційними властивостями; 2) здібностями не розшаровуватися при нагнітанні; 3) здібністю твердіти під водою; 4) необхідними строками тужавлення; 5) забезпеченням реалізації раціональних термінів приготування та нагнітання; 6) задовільною змішувальною здатністю із ґрунтом, що закріплюється; 7) необхідною водо-віддачею після завершення технологічного процесу; 8) достатньою міцністю на одновісний

стиск (Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, Tiutkin, & Andreev, 2019).

### Результати

В теперішній час розроблений ряд способів укріплення слабких ґрунтів земляного полотна та основи залізничного насипу, в тому числі струмінне закріплення із застосуванням високого тиску води та цементного розчину (500...700 атм). Разом з тим, як можна визначитися з наведеного вище аналізу такий величезний тиск викликає суттєві ускладнення як для конструкцій трубопроводів, так і для робочих органів – моніторів із соплами. Деякі переваги по збільшенню діаметрів ґрунтоцементних конструкцій при таких значеннях тиску не можуть компенсувати витрати матеріалів і праці при їх виконанні.

У зв'язку з цим, авторами були розроблені та обґрунтований спосіб і технологія закріплення слабких ґрунтів, які полягають у тому, що процес укріплення здійснюється при достатньо низькому тиску в 0,15...0,25 МПа (15...25 атм). При цьому руйнування ґрунту виконується спеціальним пристроєм – струмінно-змішувальним долотом (Романенко, & Крисан, 2007; Зоценко, та інші, 2011). При його роботі процес диспергування і перемішування ґрунту полягає в одночасній дії долота та струменю суміші цементу і води, котра подається через отвір в моніторі. Причому отвори виконані в трубчастому корпусі монітора в його кінці без спеціальних форсунок і мають діаметри, що перевищують існуючі в 5...8 разів.

Для влаштування ґрунтоцементних елементів застосовуються портландцемент та шлакопортландцемент, сульфатостійкий цемент марки не нижче 400 (Петренко, В. И., & Петренко В. Д., 2014). Для забезпечення рухомості суміші й корегування часу її тужавлення вводяться пластифікатори, суперпластифікатори та інгібітори в кількості, необхідній для забезпечення проектних характеристик. Водцементне відношення підбирається в залежності від інженерно-геологічних умов, пористості та вологості ґрунту, його гранулометричного складу, а також на основі аналізу результатів виконання робіт (Petrenko, Tiutkin, & Sviatko, 2016).

Для визначення впливу фізико-механічних властивостей ґрунтів на характеристики ґрунтоцементних конструкцій були проведені дос-

лідницькі роботи, в процесі яких виконувалися відбір зразків, що в подальшому випробувалися в стабілометрі (тривісний стиск). При цьому визначалися міцнісні та деформаційні характеристики, включно вертикальне напруження руйнування, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя та модуль пружності.

Ґрунтоцементні елементи виконувалися із 300 кг цементу на 1000 кг води, тобто при водоцементному відношенні 1,0:0,3, а також при В/Ц 1,0:0,6 з додатком в обох випадках пластифікаторів в кількості 2,5 кг на 1000 кг цементу.

Досліди проводилися в стабілометрі із розміром зразку 32 мм в діаметрі і 75 мм по висоті. Як було встановлено, при збільшенні кількості цементного компонента в зразках, їх міцність збільшувалася для трьох видів зразків: 1-й – 203, 35 кПа, 2-й – 390,1 кПа, 3-й – 547,0 кПа. При цьому показники питомого зчеплення  $C$  та кута внутрішнього тертя  $\varphi$  складали для всіх трьох зразків відповідно 10 кПа та 27 градусів, а модуль пружності досягав відповідно: 1-й – 67,8 кПа, 2-й – 130,0 кПа, 3-й – 182,6 кПа.

Руйнуюче напруження  $q_p$  та модуль пружності  $E$  були розраховані за відомими формулами:

$$q_p = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (1)$$

$$q_e = \frac{q_p}{3}, \quad (2)$$

$$E = \frac{q_p}{3\varepsilon_e}, \quad (3)$$

де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  – відповідно вертикальне та горизонтальне напруження в стабілометрі, МПа;  $q_e$  – напруження, що відповідає умовній межі пружності;  $\varepsilon_e$  – відносна деформація, що відповідає умовній межі пружності.

По результатах експериментальних досліджень для неконсолідовано-недренованого стиску в стабілометрі були побудовані паспорти міцності в координатах «тангенційні напруження – девіатор напружень  $\sigma_1 - \sigma_3$ » та графік залежності відносних деформацій від напружень, при цьому отримані значення величин зчеплення та кута внутрішнього тертя для зразків зі змістом цементу 7, 23 та 37,5 % (рис. 1-3, надано мовою комплексу при стабілометрі).

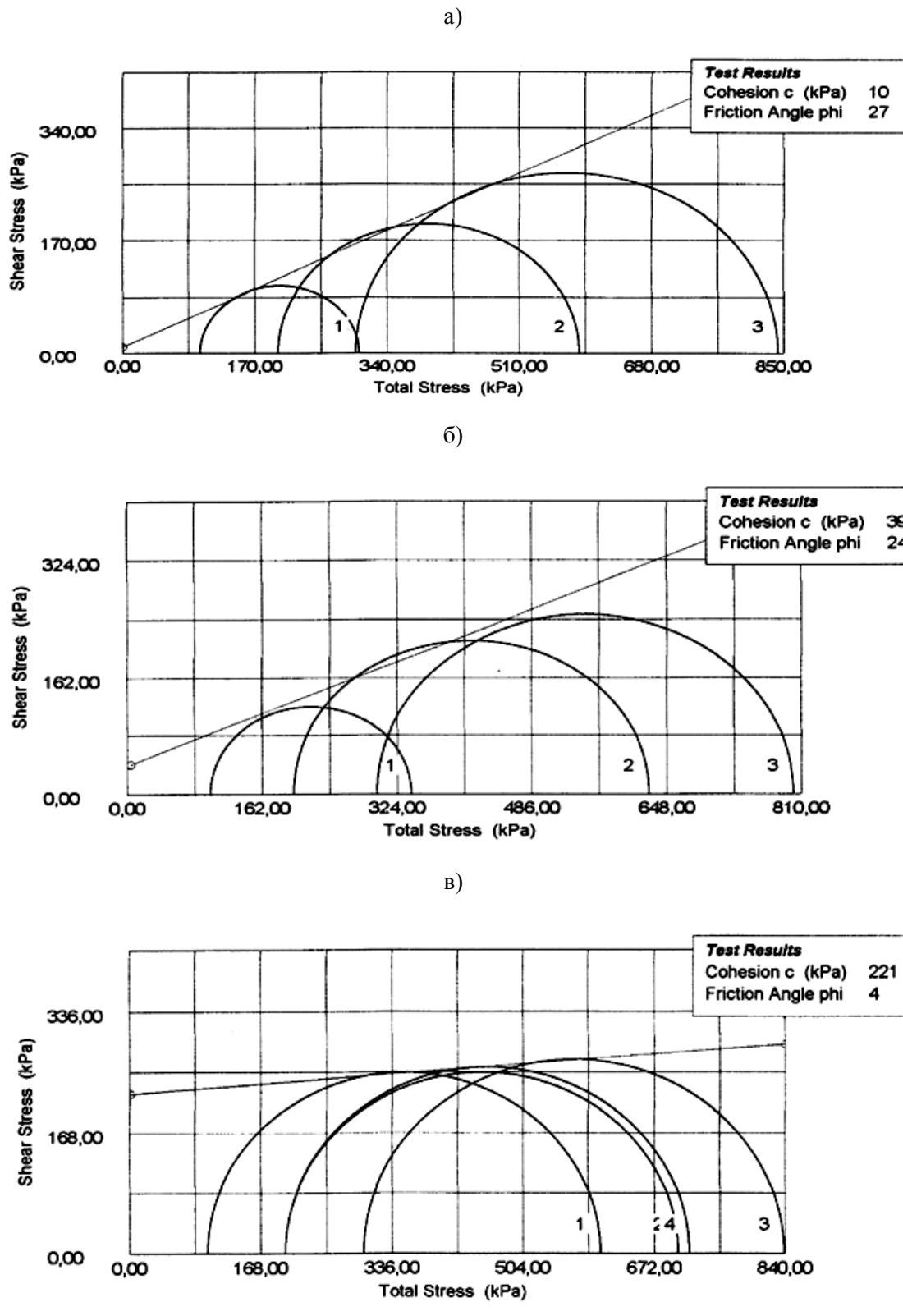
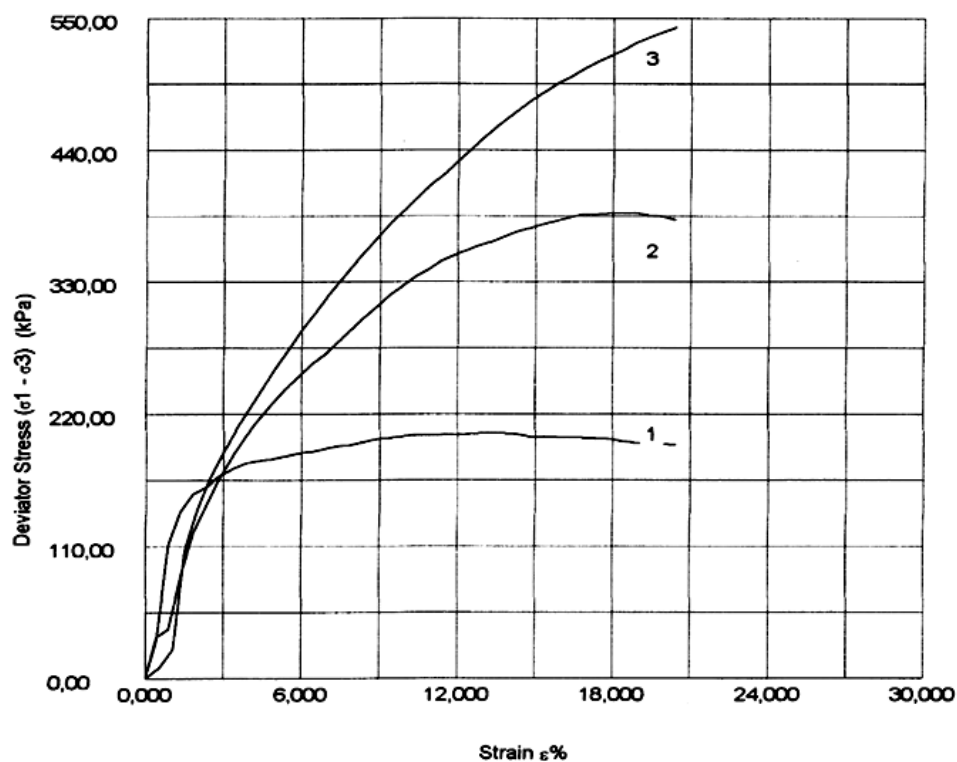


Рис. 1. Паспорти міцності ґрунтоцементних зразків при змісті цементу: а) 7 %; б) 23 %; в) 37,5 %

а)



б)

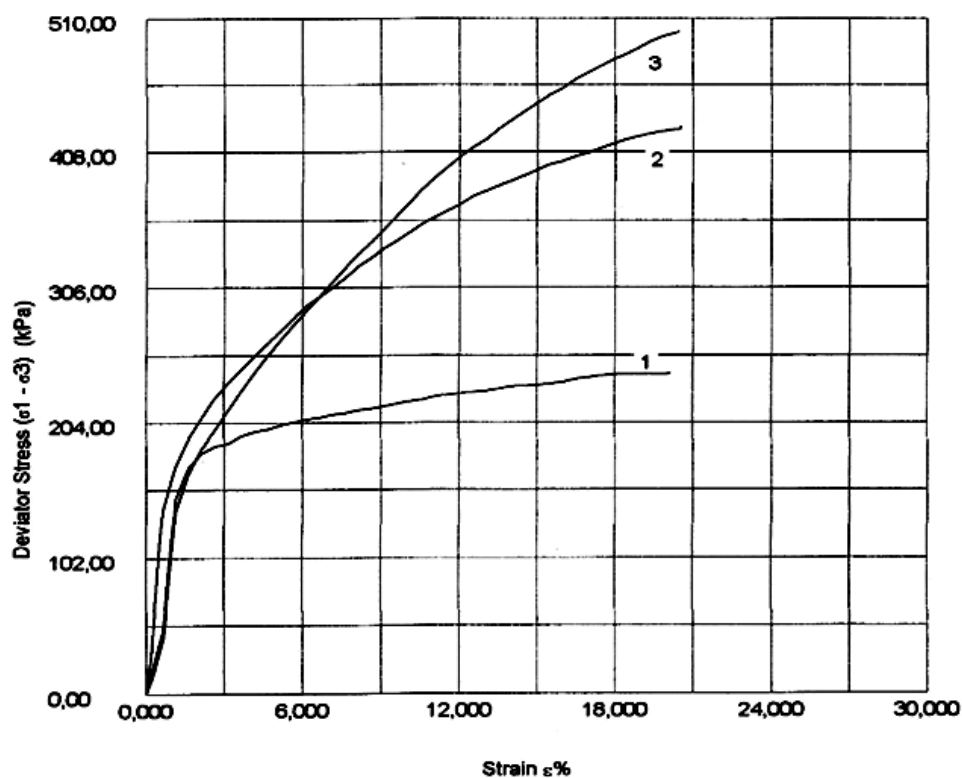


Рис. 2. Графіки відносних деформацій від напружень при змісті цементу: а) 7 %; б) 23 %

© В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, В. І. Крисан, В. В. Крисан, 2019

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

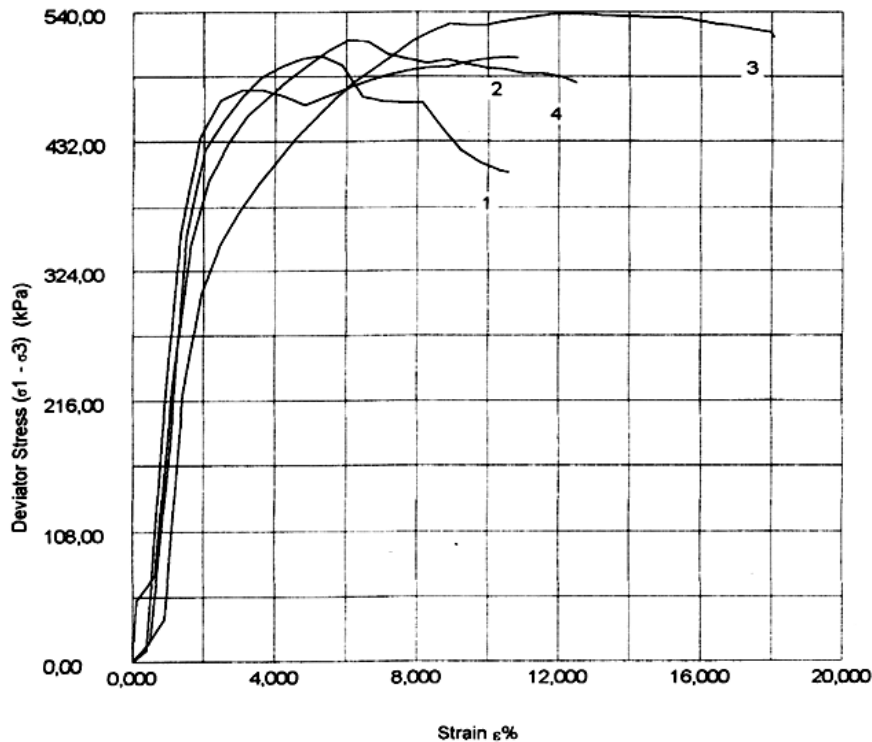


Рис. 3. Графіки відносних деформацій від напружень при вмісті цементу 37,5 %

На основі виконаних експериментальних досліджень були розраховані параметри міцності та деформативності ґрунтоцементних зразків (табл. 2).

Як виходить з аналізу наведених даних розрахунків, міцнісні та деформативні параметри значно збільшилися. Наприклад, напруження

руйнування досягає декілька сотень кілопаскалей, модуль пружності – приблизно 7...22 МПа, зчеплення – 10,0...221,0 МПа. Такі показники суттєво перевищують міцнісні характеристики ґрунтів, що укріплюються армуванням ґрунтоцементними елементами із різним вмістом цементу.

Таблиця 2

Значення міцносних та деформаційних параметрів ґрунтоцементних зразків

Номер зразка	Зміст цементу, %	Значення параметрів							
		$\sigma_1$ , кПа	$\sigma_3$ , кПа	$q_p$ , кПа	$q_e$ , кПа	$\varepsilon_e$ , дол. од.	$E$ , кПа	$C$ , кПа	$\phi$ , град
1	7,0	302,95	99,6	203,35	67,78	0,00586	11566,55	10,0	27
2	23,0	589,3	199,2	390,1	130,0	0,01905	6827,67		
3	37,5	854,9	307,1	547,8	182,6	0,02637	6924,54		
1	7,0	340,3	99,6	240,7	80,2	0,00770	10419,87	39,0	24
2	23,0	626,65	196,7	429,9	143,3	0,00710	20184,93		
3	37,5	799,3	298,8	500,5	166,83	0,01540	10833,12		
1	7,0	608,3	99,9	508,4	169,5	0,00984	17221,04	221,0	4
2	23,0	708,2	199,9	508,4	169,5	0,00779	21752,89		
3	37,5	840,0	299,8	540,2	180,1	0,01292	13942,32		

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в отриманні закономірностей міцносних (напруження руйнування при тривісному стиску, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя) та деформативних (модуль пружності) від змісту цементу в ґрунтоцементних елементах, призначених для армування земляного залізничного полотна та основи.

Практична значимість полягає в тому, що обладнання для реалізації способу укріплення армуванням ґрунтоцементними елементами, маючи невелику вагу та габарити, дозволяє ефективно обурювати та ін'єктувати земляне полотно та основу під різними кутами. Розташування обладнання на верхній будові колії та в проміжках між шпалами дозволяє бурити свердловини для подальшого суттєвого збільшення міцності та підвищення деформативності ґрунту земляного полотна та основи.

### Висновки

Важливим висновком по результатах проведених досліджень є ствердження, що розроблений спосіб укріплення та обладнання, яке дозволяє його реалізувати, значно відновлює міцнісні та деформативні характеристики залізничного земляного полотна та його основи. Виконання даної технології можливо здійснити за допомогою залізничних платформ або автомотріс, що можуть бути оснащені установками для нагнітання, здатними бурити вертикальні і похилі свердловини і проводити змішування для армування земляного полотна та основи ґрунтоцементними елементами.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press.  
Jahiro, T., & Joshida, H. (1974). On the characteristics of high speed water jet in the liquid and its utilization

on induction grouting method. *II International symposium on jet cutting technology*.

Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*.

Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema.

Maertens, J., & Maekelberg, W. (2001). Special applications of the jet-grouting technique for underpinning works. *Proceedings of the international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, 3, 1795-1798.

Mitchell, J. K., Willem, C. B., & Dimillo, A. F. (1984). Soil Reinforcement for stabilization of Earth Slopes and Embankments. *Public Roads*, 3(48), 88-95.

Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Sviatko, I. O. (2016). Estimation of subgrade strengthening influence using soilcement elements. *Science and Transport Progress*, 4 (64), 161-168.

Бройд, И. И. (2004). *Струйная геотехнология*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов.

Камбефор, А. (1971). *Инъекция грунтов. Принципы и методы*. Москва: Энергия.

Гинзбург, Л. К. (1979). *Противооползневые удерживающие конструкции*. Москва: Стройиздат.

Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., Ларцева, І. І., Шокарев, В. С., & Крисан, В. І. (2011). Характеристики штучних твердих ґрунтів, які поліпшені бурозмішувальним методом. *Світ геотехніки*, 3, 14-18.

Малинин, А. Г. (2009). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.

Петренко, В. И., & Петренко В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.

Романенко, В. І., & Крисан, В. І. (2007). Змішувально-бурове долото. *Деклараційний патент на винахід*, № 62868 від 15.03.2007.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>2\*</sup>, В. И. КРЫСАН<sup>3</sup>, В. В. КРЫСАН<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> «Мости и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> ТОВ НВО РЕМБУД, проул. Калинина, 23, оф. 7, Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (056) 236 03 67, эл. почта krysan.v.i@ukr.net

<sup>4</sup> ТОВ ПАРИТЕТ, ул. Новокрымская, 5, кв. 308, Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (056) 232 05 17, эл. почта krysan.v.i@ukr.net

© В. Д. Петренко, О. Л. Тюткин, В. И. Крисан, В. В. Крисан, 2019



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ЕГО ОСНОВАНИЯ АРМИРОВАНИЕМ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Цель.** Восстановление прочностных и деформативных характеристик земляного полотна и его основания, а также разработка способа, который можно использовать как при строительстве новых, так и при ремонте старых путей. **Методика.** Армирование грунтоцементными элементами выполняется на основе технологии закрепления слабых грунтов, при которой процесс укрепления осуществляется при достаточно низком давлении в 0,15...0,25 МПа, в отличие от струйной технологии (до 60 МПа). При этом разрушение грунта выполняется специальным устройством (струйно-смесительным долотом). Для обоснования эффективности технологии были проведены опыты на образцах грунтоцементных элементов в стабилометре (трехосное сжатие при образце 32 мм в диаметре и 75 мм по высоте). При этом определялись прочностные и деформационные характеристики, включая вертикальное напряжение разрушения, удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль упругости. **Результаты.** По результатам экспериментальных исследований для неконсолидированно-недренированного сжатия в стабилометре были построены паспорта прочности в координатах «тангенциальные напряжения – девиатор напряжений» и график зависимости относительных деформаций от напряжений. Получены результаты прочностных и деформативных параметров грунтоцементных элементов для образцов с содержанием цемента 7, 23 и 37,5%. Так, напряжение разрушения достигает нескольких сотен килопаскалей, модуль упругости – около 7...22 мегапаскалей, сцепление – 10...221 мегапаскалей. **Научная новизна.** Она заключается в получении закономерностей прочностных (напряжение разрушения при трехосном сжатии, удельное сцепление, угол внутреннего трения) и деформативных (модуль упругости) параметров от содержания цемента в грунтоцементных элементах, предназначенных для армирования земляного железнодорожного полотна и основания. **Практическая значимость.** Оборудование для реализации способа укрепления армированием грунтоцементными элементами, имея небольшой вес и габариты, позволяет эффективно обустраивать и инъектировать земляное полотно и основание под разными углами.

**Ключевые слова:** земляное полотно; основание; грунтоцементные элементы; прочностные и деформативные характеристики; струйно-смесительная технология

V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2\*</sup>, V. I. KRYSAN<sup>3</sup>, V. V. KRYSAN<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> REMBUD LLC, 23, office 7, Kalinina Way, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 236 03 67, e-mail krysan.v.i@ukr.net

<sup>4</sup> PARITET LLC, 5, app. 308, Novokrimska Str., Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 232 05 17, e-mail krysan.v.i@ukr.net

## RESTORING THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF THE SUBGRADE AND ITS FOUNDATION BY REINFORCING WITH SOIL-CEMENT ELEMENTS

**Purpose.** The restoration of the strength and deformation characteristics of the subgrade and its foundation, as well as the development of a method that can be used both in the construction of new and in the repair of old railways. **Methodology.** Reinforcement with soil-cement elements is performed on the basis of the technology of fixing of the weak soils, in which the strengthening process is carried out at a fairly low pressure of 0.15...0.25 MPa, in contrast to jet-grouting technology (up to 60 MPa). In this case, the destruction of the soil is carried out by a special device (jet-mixing bit). To justify the effectiveness of the technology, experiments were carried out on samples of soil-cement elements in a stabilometer (triaxial compression with a sample of 32 mm in diameter and 75 mm in height). In this case, strength and deformation characteristics were determined, including vertical fracture stress, adhesion, angle of internal friction, and elasticity modulus. **Findings.** According to the results of experimental stud-

ies for unconsolidated and undrained compression in a stabilometer, strength certificates were plotted in the coordinates of "tangential stresses – stress deviator" and a graph of the dependence of relative deformations on stresses. The results of strength and deformation parameters of soil-cement elements for samples with a cement content of 7, 23 and 37.5 % are obtained. According to the results, the fracture stress reaches several hundred kilopascals, the elastic modulus is about 7...22 MPa, the adhesion is 10...221 MPa. **Originality.** It consists in obtaining regularities of strength (fracture stress under triaxial compression, unit adhesion, angle of internal friction) and deformation (elasticity modulus) parameters from the cement content in cement-cement elements intended for reinforcing a subgrade railway bed and foundation. **Practical value.** Equipment for implementing the method of reinforcing with reinforced soil-cement elements, having a small weight and dimensions, allows you to efficiently drill and inject the subgrade and foundation at different angles.

**Keywords:** subgrade; base; soil cement elements; strength and deformation characteristics; jet mixing technology

## REFERENCES

- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press. (in English)
- Jahiro, T., & Joshida, H. (1974). On the characteristics of high speed water jet in the liquid and its utilization on induction grouting method. *II International symposium on jet cutting technology*. (in English)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*. (in English)
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema. (in English)
- Maertens, J., & Maekelberg, W. (2001). Special applications of the jet-grouting technique for underpinning works. *Proceedings of the international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, 3, 1795-1798. (in English)
- Mitchell, J. K., Willem, C. B., & Dimilllo, A. F. (1984). Soil Reinforcement for stabilization of Earth Slopes and Embankments. *Public Roads*, 3(48), 88-95. (in English)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Sviatko, I. O. (2016). Estimation of subgrade strengthening influence using soil-cement elements. *Science and Transport Progress*, 4 (64), 161-168. (in English)
- Brojd, I. I. (2004). *Strujnaja geotehnologija*. Moskva: Izdatel'stvo Asociacii stroitel'nyh vuzov. (in Russian)
- Kambefor, A. (1971). *Inekcija gruntov. Principy i metody*. Moskva: Jenergiya. (in Russian)
- Ginzburg, L. K. (1979). *Protivopolozhnye uderzhivajushhie konstrukcii*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., Lartseva, I. I., Shokarev, B. C., & Krysan, V. I. (2011). Kharakterystyky shtuchnykh tverdykh gruntiv, yaki polipsheni burozmishuvalnym metodom. *Svit heotekhniki*, 3, 14-18. (in Ukrainian)
- Malinin, A. G. (2009). *Strujnaja cementacija gruntov*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Petrenko, V. I., & Petrenko V. D. (2014). Obosnovanie parametrov himicheskogo zakreplenija gruntov pri stroitel'stve Kievskogo metropolitena. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 4, 60-66. (in Russian)
- Romanenko, V. I., & Krysan, V. I. (2007). Zmishuvalno-burove doloto. *Deklaratsiinyi patent na vynakhid*, № 62868 vid 15.03.2007. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 10.09.2019.

Прийнята до друку 01.10.2019.