

УДК 624.154:624.138-048.24

В. І. КРИСАН¹, В. В. КРИСАН², О. І. ДУБІНЧИК^{3*}, М. В. МАЗУРЕНКО⁴

¹ТОВ «Геопротект», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 565 89 69, ел. пошта krysan.v.i@ukr.net, ORCID 0000-0001-7497-4615

²ТОВ «Геобуд», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 631 31 22, ел. пошта geobudnerg@gmail.com, ORCID 0000-0002-9683-7838

^{3*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 582 14 88, ел. пошта o.i.dubinychuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

⁴Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 802 47 09, ел. пошта nikitamv94@gmail.com, ORCID 0009-0006-9775-7502

Аналіз результатів лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу

Мета. Автори ставлять за мету проведення лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу і аналіз отриманих результатів для обґрунтування фізико-механічних властивостей ґрунтоцементних паль, що застосовуються для підсилення слабкого земляного полотна та ґрунтової основи. **Методика.** Програма лабораторних випробувань полягала в отриманні характеристик ґрунтоцементу та проведенні аналізу отриманих результатів у випадку застосування в якості основи залізничної колії. Під час виконання будівельних робіт були відібрані зразки ґрунтоцементу. Після відбору зразки розрізались спеціальним обладнанням, а місця зрізів шліфувались для забезпечення повного контакту з плитами пресу. Після цього в прилад ущільнення було закладено зразки ґрунтоцементу під навантаженням 0,03 МПа та залишено під ним на 72 години. Навантаження зразків виконувалось ступенями з витримкою до стабілізації не менше 5 хвилин. Випробування опрацьовувались, аналізувались та розглядалися в рамках аналізу пружних властивостей. **Результати.** При досягненні тиску 1,12 МПа зразок витримувався 30 хвилин, осадка становила 0,093 мм. Після цього ступенями велось розвантаження до тиску 0,03 МПа зі стабілізацією кожної ступені. Аналіз побудованого графіку свідчить, що залишкова деформація складає 0,03 мм, а сумарна при тиску 1,12 МПа – 0,093 мм. Аналіз побудованого графіку свідчить про наявність петлі гістерезису, що демонструє роботу ґрунтоцементу в пружному режимі. При цьому модуль деформації E на різних ступенях завантаження знаходиться в діапазоні 560...750 МПа. Ґрунтоцемент демонструє стабільні пружні властивості, що робить його ефективним матеріалом для використання в цивільному, промисловому та залізничному будівництві. **Наукова новизна.** В статті на основі результатів лабораторних випробувань ґрунтоцементу остаточно доведено його високі пружні властивості під час дії циклічних навантажень, що моделюють дію рейко-шпальної решітки на баласт та земляне полотно залізниці. **Практична значимість** полягає в отриманні значень модуля пружності ґрунтоцементу, які в подальшому можна застосовувати для практичних розрахунків прогнозування осідань ґрунтових основ.

Ключові слова: ґрунтоцемент; ґрунтоцементні палі; земляне полотно; ґрунтова основа; рейко-шпальна решітка; пружні деформації; циклічні навантаження

Вступ

Залізничний транспорт є основною транспортною мережею для України, тому йому необхідно приділяти максимум уваги, забезпечуючи втілення найбільш передових та економічних зарубіжних і вітчизняних розробок [7, 8]. Практика будівництва неодноразово підтвердила доцільність, економічність та надійність використання ґрунтоцементних паль для підсилення основ фундаментів або в якості самостійних фундаментних конструкцій [5, 6, 11]. Впровадження такого рішення особливо актуальне

в умовах складних ґрунтових умов, коли основи представлені просадними, слабкими, насипними ґрунтами та існує необхідність збільшення несучої здатності фундаментів, а також у випадку будівництва в обмеженому просторі.

Однією з ключових задач під час створення ґрунтоцементних паль є визначення характеристик матеріалу [2, 10]. Хоча випробування ґрунтоцементу проводяться сертифікованими лабораторіями, відсутність нормативної бази ускладнює цей процес. Однією з мало вивчених характеристик ґрунтоцементу є його пружність.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В більшості випадків в лабораторних умовах визначається модуль деформації (E , МПа), що передбачено нормативною документацією [1]. Розробка нормативної бази для визначення характеристик ґрунтоцементу сприятиме більш ефективному використанню виконаних з нього паль у різних галузях будівництва, зокрема під час спорудження земляного полотна та підсилення ґрунтової основи.

Наразі використовуються лабораторні методи визначення фізико-механічних властивостей, адаптовані як для ґрунтів, так і для бетону, котрі не завжди відображають реальні властивості ґрунтоцементу [2]. Визначення пружності цього геокомпозиту, що поєднує ґрунт основи й цемент, є важливим для прогнозування роботи основ і фундаментів під змінними навантаженнями та аналізу деформацій ґрунтоцементних паль під циклічними навантаженнями, наприклад, поїзними [4, 14].

Використання ґрунтоцементних паль у будівництві та реконструкції залізниць є перспективним напрямком. Це пов'язано з тим, що основа шпально-рейкової конструкції зазнає циклічних навантажень від руху поїздів, а ґрунтоцементні палі можуть забезпечити необхідну стійкість і довговічність земляного полотна і безперебійну роботу рейко-шпальної решітки [7, 9, 13]. Використання ґрунтоцементних паль може знизити вартість будівництва та ремонтних робіт на залізниці.

Використання ґрунтоцементних паль у будівництві демонструє високу надійність та економічну ефективність. Однак, випробувань, присвячених визначенню їхніх фізико-механічних характеристик, недостатньо. Основні роботи в цій галузі виконуються на кафедрі буріння та геології Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» та ТОВ «Геопротект» разом із фахівцями Українського державного університету науки і технологій [2, 3, 9, 10, 15]. Проте навіть ці випробування не повною мірою розкривають залежність пружності ґрунтоцементу від його складу та навантажень.

Існують випробування, які аналізують вплив додавання золи виносення на фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу [2]. Зокрема, експериментально визначено оптимальний склад ґрунтоцементу з різним вмістом золи, що

дозволяє покращити його властивості. Крім того, моделювання процесу виготовлення та випробування ґрунтоцементних паль з урахуванням ґрунтових умов показало, що додавання пластифікаторів та зміна глибини занурення паль впливають на їхню міцність.

Щодо застосування ґрунтоцементних паль у залізничному транспорті інформація дійсно обмежена. Разом з тим, технологія струминної цементації ґрунтів, яка використовується для створення ґрунтоцементних паль, вважається перспективною для підземного будівництва, включаючи тунелі та інші інфраструктурні об'єкти [5, 6]. Таким чином, необхідні подальші випробування для глибшого розуміння залежності пружності ґрунтоцементу від його складу та навантажень, а також для оцінки можливостей використання ґрунтоцементних паль у будівництві, реконструкції та ремонті об'єктів залізничного транспорту.

Найбільш поширеним способом будівництва залізниць є спорудження котловану, дно якого ущільнюється, після цього укладається шар щебеню, тобто баласт, і ведеться укладка рейко-шпальної решітки. Це доволі затратний спосіб будівництва і його експлуатація потребує значних затрат. Досягти рівномірності щільності по всій довжині та ширині конструкції дуже складно. Тому під час експлуатації втрачається стабільність колії в поздовжньому та поперечному напрямках. Затрати на утримання залізничної колії доволі значні, а на відтинках шляху, де основою баласту є слабкі ґрунти, часто виникає необхідність заміни баласту по причині проникнення в нього ґрунту, що погіршує фізико-механічні характеристики основи.

Більш перспективними є монолітні плитно-рейкові конструкції, бо вони забезпечують стабільність як в горизонтальному, так і вертикальному напрямках [8]. Їхня перевага перед традиційною технологією баластування може бути досягнута під час заміни ґрунтової подушки та баластного щебеневого шару ґрунтоцементними палями.

В межах України зустрічаються прояви багатьох складних інженерно-геологічних умов (лесові просадні ґрунти, зсуви, карсти, суфозія, території підроблювань, пов'язаних із шахтами). За даними АТ «Укрзалізниця» загальна протяжність земляного полотна на залізницях

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

України становить більше 21 872 км, і з них схильних до деформації більше 870 км, а це бар'єрні ділянки, де діють обмеження швидкості, що негативно впливає на провізну та пропускну спроможність залізниць. Основною причиною таких явищ є те, що при збільшенні швидкостей та навантажень грунт земляного полотна проникає в баластний шар, що зменшує несучу здатність основи. Тому впровадження використання ґрунтоцементних паль буде вирішенням багатьох проблем.

Мета

Метою наукової статті є проведення лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу і аналіз отриманих результатів для обґрунтування фізико-механічних властивостей ґрунтоцементних паль, що застосовуються для підсилення слабого земляного полотна та ґрунтової основи.

Методика

Відомо, що під час руху залізничного транспорту при збільшенні швидкості навантаження на ось значно зростає, як і навантаження на ґрунтову основу земляного полотна. Його деформації відбуваються тому, що напружений стан змінюється під впливом низки факторів. Суттєву роль в цьому відіграє дисбаланс мас, нерівномірність прокату, повзуни, наявність стиків, вітрові навантаження на вагони. Також, в залежності від кліматичних умов, значно змінюється вологість ґрунтів основи та самого земляного полотна, що змінює величину прогину залізничної колії.

Ґрунти основи і земляного полотна працюють в специфічному режимі, який полягає в тому, що цикли навантаження та розвантаження чергуються. Крім того, і величини навантаження змінні, оскільки на це впливає значна кількість як природних, так і техногенних факторів. Відповідно, випробування повинно ґрунтуватися на циклічності навантажень.

Для проведення лабораторного випробування відібрані зразки ґрунтоцементу на об'єкті, що, згідно інженерно-геологічних вишукувань, має геологічну будову, наведену на рис. 1.

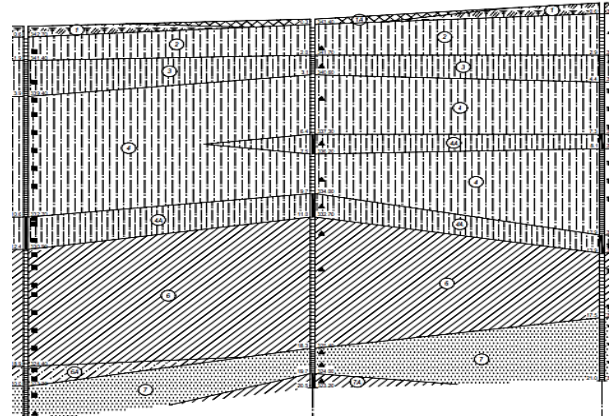


Рис. 1. Інженерно-геологічний переріз ділянки робіт

Fig. 1. Engineering and geological cross-section of the work site

Під час виконання будівельних робіт були відібрані зразки ґрунтоцементу. Маса витікала з гирла свердловини при перебуванні інтервалу ґрунту ПГЕ–2 – ПГЕ–3. Відмінністю випробування є те, що маса ґрунтоцементу пакувалась в круглі поліетиленові ємності та в такому вигляді зберігалась впродовж двох років. Зберігання проходило в складі, де було відсутнє опалення та не було регулювання вологості. До настання морозів від часу формування зразків пройшло більше 60 днів. Після цього зразки розрізались спеціальним обладнанням, а місця зрізів шліфувались для забезпечення повного контакту з плитами пресу. Для випробувань підготовлені зразки діаметром 100 мм, висотою 80 мм та щільністю 1,41 г/см³.

Основою ґрунтоцементу був суглинок важкий пилуватий, напівтвердий, лесовий, просадний та суглинок легкий пилуватий, твердий, лесовий, просадний, характеристики яких, як і інших ґрунтів, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Table 1

Physical and mechanical characteristics of soils

Назва ІГЕ	Назва ґрунту	Щільність ρ , г/см ³	Модуль деформації E , МПа	Кут внутріш- нього тертя φ , град	Зчеплен- ня C , кПа
ІГЕ–1А	Рослинний шар: суглинок легкий пілуватий, слабо гумусований (відносний вміст органічної речовини $I_r = 0,025$), з корінням рослин	–	–	–	–
ІГЕ–1	Рослинний шар: суглинок легкий пілуватий, слабо гумусований (відносний вміст органічної речовини $I_r = 0,025$), з корінням рослин	–	–	–	–
ІГЕ–2	Суглинок важкий пілуватий, напівтвердий, лесовий, просадний, з карбонатними стяжіннями, жовто-палевий	1,36	3...7	13	10
ІГЕ–3	Суглинок легкий пілуватий, твердий, лесовий, просадний, з карбонатними стяжіннями, бурий, жовто-бурий;	1,34	6...12	14	14
ІГЕ–4	Суглинок легкий пілуватий, твердий та напівтвердий, з карбонатними стяжіннями, палево-жовтий, жовтий	1,40	6...9	13	14
ІГЕ–4А, ІГЕ–4Б	Суглинок легкий пілуватий, тугопластичний, бурувато-жовтий, палево-жовтий	1,43	5...6	11	10
ІГЕ–6	Суглинок важкий пілуватий, напівтвердий, з рідкими прошарками піску, включеннями зерен карбонатів, окислів марганцю, буро-жовтий, жовто-палевий, бурувато-сірий	1,47	10	17	18
ІГЕ–6А	Супісок пілуватий, твердий, жовтий, бурувато-сірий	1,59	8	14	11
ІГЕ–7	Пісок дрібний та пілуватий, середньої щільності та щільний, від маловологого до водонасиченого (нижче рівня ґрунтових вод)	1,66	20	5	7
ІГЕ–7А	Суглинок важкий пілуватий, тугопластичний, сірий, буро-жовтий	1,84	23	11	6

Програма лабораторних випробувань полягала в отриманні характеристик ґрунтоцементу та проведенні аналізу отриманих результатів у випадку застосування в якості основи залізничної колії. Як уже відмічалось [7, 9], робота основи залізничного полотна специфічна, тому

було обрано циклічні навантаження на зразки. За середнє навантаження, що створюється баластом та рейково-шпальною решіткою, прийнято 0,03 МПа.

Результати

Після того, як в прилад ущільнення було закладено зразки ґрунтоцементу під навантаженням 0,03 МПа та залишено під ним на 72 години, вони ставились під прес та знову навантажувались значенням тиску 0,03 МПа. Показники індикаторів приймалися за 0,00 мм стиснення (скидання переміщення). В констру-

кції пресу передбачено, що навантаження передається штампом, і його переміщення фіксують чотири індикатори годинникового типу, котрі мають точність 0,01 мм. Далі навантаження виконувалось ступенями з витримкою до стабілізації не менше 5 хвилин (рис. 2, чорна гілка графіку).

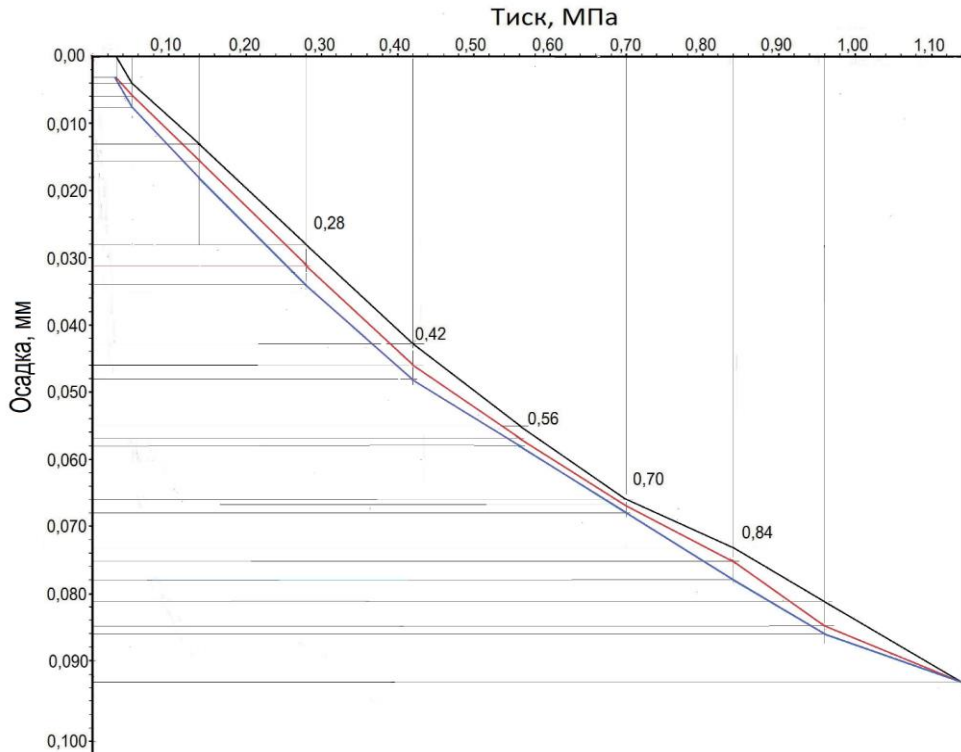


Рис. 2. Графіки циклу «навантаження – розвантаження»

Fig. 2. Graphs of the «loading – unloading» cycle

При досягненні тиску 1,12 МПа зразок витримувався 30 хвилин, осадка становила 0,093 мм. Після цього ступенями проводилося розвантаження до тиску 0,03 МПа зі стабілізацією кожної ступені. Аналіз графіку (рис. 2, синя гілка) свідчить, що, залишкова деформація складає 0,03 мм, а сумарна при тиску 1,12 МПа – 0,093 мм. Повторне навантаження (рис. 2, червона гілка) також було виконане ступенями, і перед початком виконання його зразок під тиском 0,03 МПа витримувався 24 години.

Аналіз графіку свідчить про наявність петлі гістерезису, як це вже було відмічено авторами в роботі [10], що демонструє роботу ґрунтоцементу в пружному режимі. При цьому модуль

деформації E на різних ступенях завантаження знаходиться в діапазоні 560...750 МПа, що досить добре збігається з даними, що отримані іншими авторами для ґрунтоцементу із суглинку (вміст цементу 15...20 %), а саме значень $E = 400...650$ МПа [2, 12].

Наукова новизна та практична значимість

В статті на основі результатів лабораторних випробувань ґрунтоцементу остаточно доведено його високі пружні властивості під час дії циклічних навантажень, що моделюють дію рейко-шпальної решітки на баласт та земляне полотно залізниці. Практична значимість дос-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

лідження полягає в отриманні значень модуля пружності ґрунтоцементу, які в подальшому можна застосовувати для практичних розрахунків прогнозування осідань ґрунтових основ.

Висновки

В науковій статті проведені випробування ґрунтоцементу та проаналізовано їхні результати, що є важливим кроком у визначенні характеристик цього геокомпозиту як перспективного будівельного матеріалу. Ґрунтоцемент демонструє стабільні пружні властивості, що робить його ефективним матеріалом для використання в цивільному, промисловому та залізничному будівництві. Результати цих та

попередніх досліджень підтверджують необхідність подальшого вивчення ґрунтоцементу, які допоможуть обґрунтувати та донести до проєктувальників раціональність використання ґрунтоцементу в різних будівельних проєктах.

В подальшому в рамках накресленої задачі необхідно провести більш повний економічний аналіз використання ґрунтоцементу порівняно з традиційними матеріалами під час його застосування при будівництві залізниць з урахуванням виконання ремонтних та регламентних робіт. Проведення подальших досліджень та вивчення всіх аспектів застосування ґрунтоцементу допоможе розширити його використання в будівельній галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.1-10:2018. *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 42 с.
2. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом* : монографія. Харків : Друкарня Мадрид, 2016. 93 с.
3. Раздуй Р. В., Винников Ю. Л. Результати комплексних досліджень армованих ґрунтоцементними елементами основ, виготовлених за бурозмішувальною технологією. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 23. С. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281152>
4. Anoyatis G., Stijn F., Orakci O., Tsikas A. Soil-pile interaction in vertical vibration in inhomogeneous soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023. Vol. 52, Iss. 14. P. 4582–4601. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3968>
5. Gazzarrini P. A Brief History of Jet Grouting in the Last 50 Years. *GeoStrata Magazine*. 2021. Vol. 25, Iss. 3. P. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.1061/geosek.0000025>
6. Kazemian S., Huat B. B., Arun P., Barghchi M. A review of stabilization of soft soils by injection of chemical grouting. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2010. Vol. 4, Iss. 12. P. 5862–5868. URL: https://www.researchgate.net/publication/245587265_A_review_of_stabilization_of_soft_soils_by_injection_of_chemical_grouting
7. Kurhan D., Kurhan M. Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708, Iss. 1. Art. 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012013>
8. Kurhan M., Kurhan D. Problems of providing international railway transport. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. Art. 01007. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001007>
9. Krysan V., Krysan V., Petrenko V., Tiutkin O., Andrieiev V. Improving the safety of railway subgrade when it is strengthened using soil-cement elements. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. Art. 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403006>
10. Krysan V., Krysan V., Tiutkin O., Timchenko R., Krishko D. The results of experimental studies of the soil cement deformation capacity under the «loading-unloading» cycle conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1491. Art. 012005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012005>
11. Petrenko V., Bannikov D., Kharchenko V., Tkach T. Regularities of the deformed state of the geotechnical system “soil base–micropile”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Art. 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028>
12. Tiutkin O., Autelitano F., Giuliani F., Neduzha L. Stress-strain behavior of railway embankments stabilized with grouted micropiles. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Vol. 102. P. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.088>

13. Tiutkin O. L., Neduzha L., Kalivoda J. Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*. 2021. Vol. 16, Iss. 2. P. 189–197.
URL: http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2021/zeszyt2/2021t16z2_16.pdf
14. Tiutkin O., Radkevych A., Dubinchyk O., Kharchenko V. Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18, Iss. 2. P. 104–112.
DOI: <https://doi.org/10.33271/mining18.02.104>
15. Vynnykov Y., Razdui R. The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2021. Vol. 2, Iss. 57. P. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2588>

V. I. KRYSAN¹, V. V. KRYSAN², O. I. DUBINCHYK^{3*}, M. V. MAZURENKO⁴

¹Geoprotect LLC, app. 308, Novokrimska St., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 565 89 69, e-mail krysan.v.i@ukr.net, ORCID 0000-0001-7497-4615

²Geobud LLC, app. 308, Novokrimska St., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 631 31 22, e-mail geobuddnepr@gmail.com, ORCID 0000-0002-9683-7838

^{3*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 582 14 88, e-mail o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

⁴Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 802 47 09, e-mail nikitamv94@gmail.com, ORCID 0009-0006-9775-7502

Analysis of Laboratory Test Results of Elastic Properties of Soil Cement

Purpose. The authors set the goal of determining the principles of the concept of reverse conversion to substantiate the use of underground metro structures as shelters for critical infrastructure facilities. **Methodology.** The laboratory test program consisted of obtaining the characteristics of soil cement and analyzing the results obtained in the case of use as a railway track base. During construction work, soil cement samples were taken. After selection, the samples were cut with special equipment, and the cut points were ground to ensure full contact with the press plates. After the soil cement samples were placed in the compaction device under a load of 0.03 MPa and left under this load for 72 hours. The loading of the samples was carried out in stages with a holding time of at least 5 minutes until stabilization. The tests were processed, analyzed and considered within the framework of the analysis of elastic properties. **Findings.** When the pressure reached 1.12 MPa, the sample was kept for 30 minutes, the settlement was 0.093 mm. After that, unloading was carried out in stages to a pressure of 0.03 MPa with stabilization of each stage. Analysis of the constructed graph shows that the residual deformation is 0.03 mm, and the total at a pressure of 1.12 MPa is 0.093 mm. Analysis of the graph shows the creation of a hysteresis loop, which characterizes the operation of soil cement in the elastic mode. At the same time, the deformation modulus E at different loading stages is in the range of 560...750 MPa. Soil cement demonstrates stable elastic properties, which makes it an effective material for use in civil, industrial and railway construction. **Originality.** The article, based on the results of laboratory tests of soil cement, finally proves its high elastic properties under the action of cyclic loads, which simulate the action of the rail-sleeper grid on the ballast and the railway subgrade. **Practical value** lies in obtaining the values of the modulus of elasticity of soil cement, which can be further used for practical calculations of predicting the settlements of soil bases.

Keywords: soil cement; soil cement piles; subgrade; soil base; rail-sleeper grid; elastic deformations; cyclic loads

REFERENCES

1. *Osnovy i fundamenty budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*, 42 DBN V.2.1-10:2018. (2018). (in Ukrainian)
2. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliaiut-sia za burozmishuvalnym metodom: monografiya*. Kharkiv : Drukarnia Madryd. (in Ukrainian)
3. Razdui, R. V., & Vynnykov, Yu. L. (2023). Results of complex research of soil bases reinforced by soil-cement elements manufactured using drilling mixing method. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 23, 66-78. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281152> (in Ukrainian)
4. Anoyatis, G., Stijn, F., Orakci, O., & Tsikas, A. (2023). Soil-pile interaction in vertical vibration in inhomogeneous soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(14), 4582-4601.
DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3968> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

5. Gazzarrini, P. (2021). A Brief History of Jet Grouting in the Last 50 Years. *GeoStrata Magazine*, 25(3), 70-77. DOI: <https://doi.org/10.1061/geosek.0000025> (in English)
6. Kazemian, S., Huat, B. B., Arun, P., & Barghchi, M. (2010). A review of stabilization of soft soils by injection of chemical grouting. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(12), 5862-5868. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/245587265_A_review_of_stabilization_of_soft_soils_by_injection_of_chemical_grouting (in English)
7. Kurhan, D., & Kurhan, M. (2019). Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1), 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012013> (in English)
8. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2018). Problems of providing international railway transport. *MATEC Web of Conferences*, 230, 01007. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001007> (in English)
9. Krysan, V., Krysan, V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andrieiev, V. (2019). Improving the safety of railway subgrade when it is strengthened using soil-cement elements, *MATEC Web of Conferences*, 294, 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403006> (in English)
10. Krysan, V., Krysan, V., Tiutkin, O., Timchenko, R., & Krishko, D. (2025). The results of experimental studies of the soil cement deformation capacity under the «loading-unloading» cycle conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1491, 012005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012005> (in English)
11. Petrenko, V., Bannikov, D., Kharchenko, V., & Tkach, T. (2022). Regularities of the deformed state of the geotechnical system “soil base – micropile”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028> (in English)
12. Tiutkin, O., Autelitano, F., Giuliani, F., & Neduzha, L. (2024). Stress-strain behavior of railway embankments stabilized with grouted micropiles. *Alexandria Engineering Journal*, 102, 75-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.088> (in English)
13. Tiutkin, O. L., Neduzha, L., & Kalivoda, J. (2021). Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*, 16(2), 189-197. Retrieved from http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2021/zeszyt2/2021t16z2_16.pdf (in English)
14. Tiutkin, O., Radkevych, A., Dubinchyk, O., & Kharchenko, V. (2024). Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*, 18(2), 104-112. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining18.02.104> (in English)
15. Vynnykov, Y., & Razdui, R. (2021). The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 74-81. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2588> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.11.2025

Рекомендовано до публікації: 12.12.2025

Дата публікації: 27.03.2026