

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.731.2(477)(4-6ЄС)

О. І. ДУБІНЧИК^{1*}, В. А. МІРОШНИК², О. Л. ТЮТЬКІН³

^{1*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта o.i.dubinchuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

² Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

³ 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

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЙ ПІДСИЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

Мета. Обґрунтування концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі. В статті на базі досвіду, отриманого в області підвищення міцності та стійкості об'єктів, зведених з ґрунту, та на основі ранжування параметрів доводиться гіпотеза про найбільшу ефективність вертикальних елементів підсилення на відміну від всіх інших у випадку перевлаштування під суміщену колію (1520/1435 мм). **Методика.** Розглянуто регламентовані ЦП-0204 «Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії» варіанти підсилення земляного полотна геотекстилем або георешіткою, а також шаром, що мало деформується. Проаналізовано розроблені і впроваджені в Європейському Союзі три концепції підсилення за допомогою: 1) геосинтетичних матеріалів; 2) вертикальних паль або мікропаль; 3) комбінації геосинтетичних матеріалів з палями. **Результати.** Проведене ранжування методів підсилення земляного полотна за позитивними та негативними параметрами, які характеризують ситуацію розміщення в ґрунтовій матриці елементів підсилення. Параметри підсилення розділені на позитивні (зменшення горизонтальних та вертикальних деформацій) та негативні (параметри технології). Визначено, що максимальне значення позитивного впливу на зменшення вертикальних деформацій надають варіанти вертикальних паль або мікропаль, створених на основі бурозмішувальної технології або jet-grouting. **Наукова новизна.** Вперше на основі формул ранжування за позитивними та негативними параметрами виконане обґрунтування концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі. **Практична значимість.** Будь-який метод підсилення до його практичної реалізації може бути ранжований, тобто може бути визначена його ефективність та раціональність під час впровадження в конкретних ситуаціях експлуатації залізниці, земляне полотно якої потребує підсилення.

Ключові слова: земляне полотно, підсилення, напружено-деформований стан, геосинтетичні матеріали, ґрунтоцемент, ранжування параметрів

Вступ

Земляне полотно залізниці не є найбільш навантаженим елементом серед тих, що складають систему «рухомий склад – залізнична колія», оскільки напруження від колеса потягу безпосередньо сприймає рейко-шпальна решітка. Не викликає сумнівів, що рейки, скріплення, підкладки, шпали та щебеневий баласт є найбільш напруженими елементами вказаної системи (Даніленко, 2010). Проте безсумнівним фактом є також і те, що матеріали, з яких вони створені, тобто сталь із високим вмістом вуглецю, залізобетон та гранітний щебінь, мають значно вищі міцнісні та деформаційні характеристики, ніж у матеріалу земляного полотна.

Система «рухомий склад – залізнична колія» влаштована таким чином, щоб зосереджені напруження в місці контакту колеса та рейки максимально розподілялися вже на основному майданчику і далі, в земляному полотні. Проте навіть такий логічний інженерний хід доволі часто не є запорукою неперевищення напруженнями в земляному полотні міцності його матеріалу, яким є ущільнений суглинок. Саме земляне полотно і певною мірою його непідготовлена ґрунтова основа є об'єктами виникнення так званих «хвороб», а саме дефектів, деформацій і пошкоджень, які, в свою чергу, вимагають ремонту або навіть реконструкції залізниці для забезпечення її нормального експлуатаційного стану (ЦП/0138, 2006).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Слід відзначити, що основні «хвороби» земляного полотна, особливо його деформації, мають декілька причин виникнення.

Першою причиною є недотримання технології спорудження земляного полотна, а саме: 1) недостатнє або неякісно виконане ущільнення шарів суглинку; 2) недостатній або відсутній контроль за вологісним станом суглинку, що ущільнюється за умови досягнення оптимальної вологості; 3) недостатній або відсутній контроль за щільністю кожного відсипаного шару і відповідно за отриманням проектного модуля деформації (35...40 МПа за ЦП-0204, 2009). Ці основні недоліки поодиночі або в комплексі не дають змоги спорудити якісне однорідне земляне полотно, що максимально довгий термін деформувалося б в пружній стадії без локального руйнування ґрунту і, тим паче, без глобальної втрати міцності і стійкості.

Другою причиною є недостатньо раціональна експлуатація із наступними вірогідними ситуаціями: 1) перевищенням тиску на вісь (з 23,5 до 25 т); 2) недотриманням рекомендованої швидкості рухомого складу; 3) порушенням умов вологісного режиму; 4) збільшенням термінів ремонтних робіт тощо. Навіть якісно зведене земляне полотно, яке має проектні щільності при оптимальній вологості і значення модуля деформації ґрунту, а також достатній для експлуатації комплекс інженерних споруд, переходить в пластичну стадію під час зміни вантажнонапруженості. Це призводить до появи залишкових деформацій в локальній області

і, відповідно, потребує робіт по приведенню рейко-шпальної решітки до нормального режиму пропуску рухомого складу (Петренко, Тютькін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019).

Безсумнівно, поєднання обох проаналізованих вище причин завдяки синергетичному ефекту збільшує ймовірність катастрофічно швидкого накопичення локальних деформацій основного майданчика або інших частин земляного полотна і його глобального руйнування, наприклад, після зсуву укусу.

Окрім розглянутих причин, слід проаналізувати ще один випадок, який відноситься до другої причини. Він пов'язаний з перспективним розвитком українських залізниць, а саме з їхнім потенційним перевлаштуванням під суміщену, а потім і на європейську колію. Суміщення колій із значеннями 1520 і 1435 мм призведе до зміни напружено-деформованого стану земляного полотна, що в комплексі з його недостатньо міцним та стійким станом може призвести до аварій та руйнувань.

Вказана зміна напружено-деформованого стану характеризується явною неоднорідністю формування і розвитку напружень і переміщень в щебеневому баласті (Курган, М. Б., Курган, Д. М., Бражник, & Ковальський, 2019), що об'єктивним чином пов'язано із конструкцією шпали Ш2С-1 для суміщеної конструкції колії виробництва ПАТ «Коростенський завод залізобетонних шпал», яка визначає сценарії асиметричного прикладення поїзного навантаження (рис. 1).

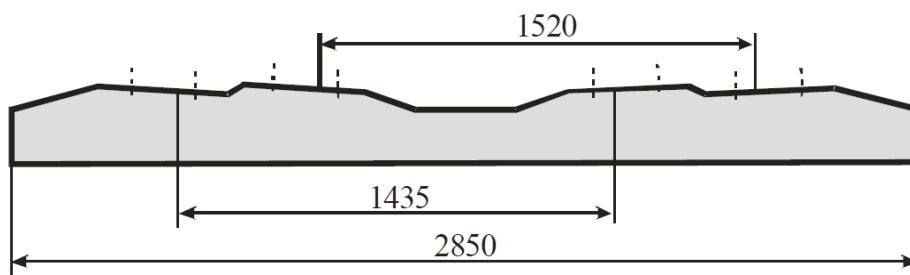


Рис. 1. Залізобетонна шпала Ш2С-1 для суміщеної конструкції колії (схема з роботи Курган, М. Б., Курган, Д. М., Бражник, & Ковальський, 2019)

Оскільки зведення нового земляного полотна із шириною колії 1435 мм на всій протяжності українських залізниць є неможливим, то основним методом приведення цієї вже існуючої конструкції, що довгий термін експлуатувалася, є підсилення шляхом уведення елементів арму-

вання з метою приведення ґрунтової матриці до відносно однорідного стану і, відповідно, підвищення міцності і стійкості, а також попередження можливого розвитку дефектів, деформацій і пошкоджень під час впровадження європейської колії на території України.

Мета

Метою наукової статті є обґрунтування концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі. В роботі на базі досвіду, отриманого в області підвищення міцності та стійкості об'єктів, зведених з ґрунту, а також на основі ранжування параметрів доводиться гіпотеза про найбільшу ефективність вертикальних елементів підсилення на відміну від всіх інших у випадку перевлаштування під суміщену колію (1520/1435 мм).

Методика

Підсилення матеріалу земляного полотна зародилося і надалі розвивається як армування, тобто уведення до ущільненого суглинку елементів різного орієнтування в ґрунтовій матриці (горизонтальне, вертикальне, похиле), матеріалу (геосинтетичні матеріали, цементно-піщаний розчин, ґрунтоцемент, щебінь, асфальт, комбіновані варіанти тощо), характеру взаємодії (стиск, розтяг, перерозподіл компонент розтягу і стиску).

Перед тим, як перейти до аналізу конкретних варіантів підсилення, що застосовуються в Україні та Європейському Союзі, слід підкреслити концептуальну різницю між конструкційним армуванням, наприклад, бетону під час створення залізобетону, та армуванням ґрунтових об'єктів. Вона полягає в різних термінах часу введення елементів армування і, відповідно, в їхній роботі: металеву арматуру розміщують в бетоні під час формування залізобетонної конструкції, а елементи армування в земляному полотні розташовуються після деякого терміну експлуатації, тобто пропуску конкретної кількості пар потягів. Ця різниця формує сенс армування залізобетону як створення сталобетонного композиту, в якому коригується недолік одного з компонентів (мала міцність бетону на розтяг), а у випадку створення геокомпозиту, тобто підсиленого земляного полотна, сенс елементів армування полягає лише у підтримці вже існуючої ґрунтової матриці.

Таким чином, підсилення земляного полотна, на відміну від створення залізобетону, застосовується не на початку спорудження ґрунтової конструкції, оскільки уведення елементів підсилення одразу виключає спрямування на створення якісної споруди. Підсилення земля-

ного полотна подібне до підсилення частково зруйнованих залізобетонних балок за допомогою зовнішньої арматури, тобто має сутність допомоги конструкції, що під час експлуатації зменшила свою міцність та стійкість.

Основні види підсилення земляного полотна значно відрізняються один від одного (рис. 2).

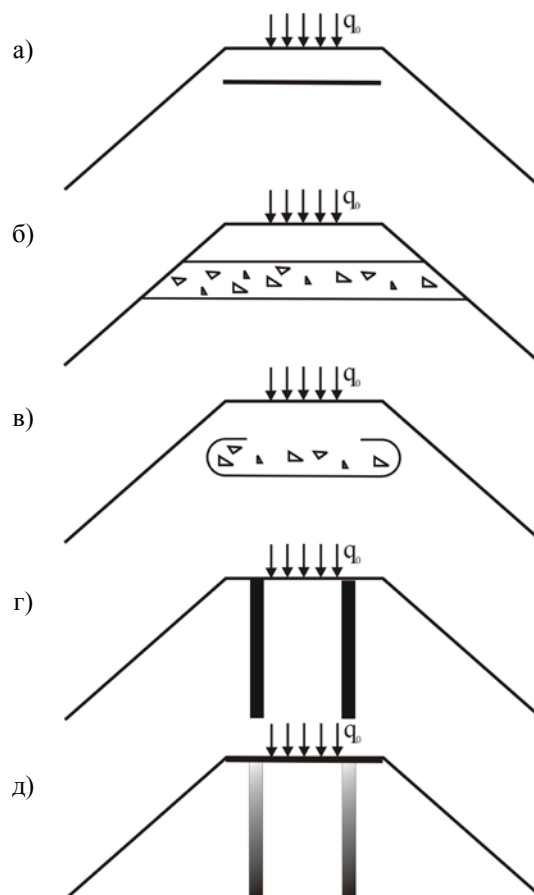


Рис. 2. Схеми основних видів підсилення земляного полотна:
а) за допомогою геосинтетичних матеріалів;
б) уведення шару, що мало деформується;
в) комбінація (а) і (б); г) влаштування вертикальних паль або мікропаль; д) комбінація (а) і (г)

Основним нормативним документом, що регламентує підсилення земляного полотна залізниць України, є «Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії» (ЦП-0204, 2009). Концептуально цей документ базується на уведенні в ґрунтову матрицю горизонтальних елементів підсилення і пропонує два основні варіанти: 1) за допомогою геосинтетичних матеріалів та 2) із застосуванням шарів, що мало деформуються (рис. 3).

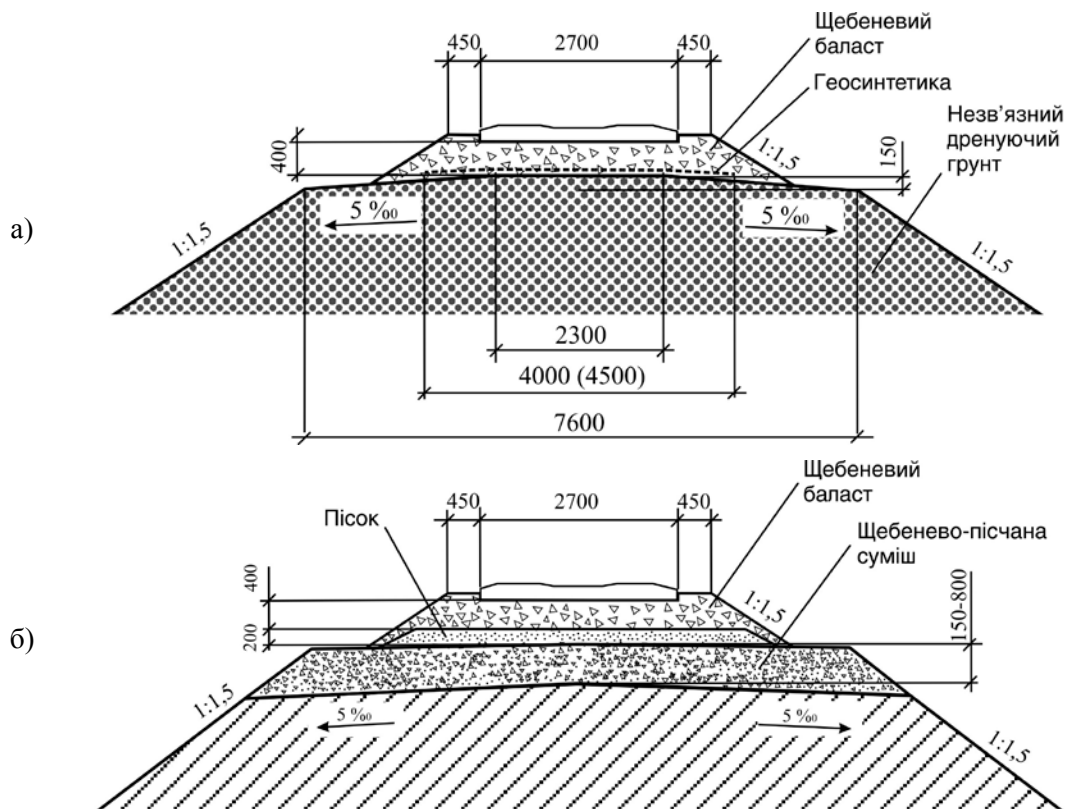


Рис. 3. Основні варіанти підсилення (за ЦП-0204, 2009):
а) геотекстилем або георешіткою; б) шаром, що мало деформується

В Європейському Союзі розроблені і впроваджуються три концепції підсилення земляного полотна за допомогою: 1) геосинтетичних матеріалів (Fischer, 2022); 2) вертикальних паль або мікропаль (див. рис. 1, г) (Briançon, & Simon, 2017; Hwang, Kim, & Shin, 2017; Pshinko, Petrenko, Tiutkin, et al., 2019; Петренко, Андреев, & Харченко, 2021); 3) комбінації геосинтетичних матеріалів з палями (*Geosynthetic-Reinforced-Pile-Supported*, скорочено GRPS) (див. рис. 1, д) (Alsirawan, 2021).

Друга концепція, що концептуально базується на уведенні до ґрунтової матриці земляного полотна вертикальних елементів, в Україні розроблена теоретично і успішно впроваджена практично, але не на залізниці, а на об'єктах промислового та цивільного будівництва, під час підсилення фундаментів.

Третя концепція, що комбінує горизонтальний (георешітки) і вертикальні (пали або мікропалі) елементи підсилення в Європейському Союзі наразі потужно розвивається, проте в Україні розглядається мало і недетально, знаходячись на первинному етапі досліджень.

На сьогоднішній термін панівною концепцією підсилення земляного полотна українських залізниць є перша, що базується на уведенні в ґрунтову матрицю горизонтальних елементів підсилення (геосинтетичних матеріалів або шарів, що мало деформуються).

Склалася парадоксальна наукова ситуація, оскільки за останні п'ятнадцять років з'явилася низка вітчизняних і закордонних статей, в яких достатньо ґрунтовно доведена ефективність вертикальних елементів, однак ця концепція, на відміну від Європейського Союзу, на українських дорогах не втілювалася навіть на експериментальних дільницях. Слід відмітити, захищаючи фахівців, які працюють на українській залізниці, що найбільш вагомі результати, які доводять ефективність підсилення вертикальними елементами, отримані за останні п'ять років, що прийшлися на важкі часи пандемії COVID-19 і повномасштабної війни російської федерації проти України (Петренко, Тютькін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019; Tiutkin, Neduzha, & Kalivoda, 2021; Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, & Тютькін, 2023).

Безсумнівно, відмовлятися від підсилення за допомогою горизонтальних елементів, не слід. Проте, область застосування першої концепції варто значно обмежити, оскільки теоретичні й експериментальні дослідження підсилення геотекстилем або георешіткою (в незаанкереному варіанті, див. рис. 3, а) довели, що ці схеми мінімальним чином впливають на компоненту деформування земляного полотна, що превалює, а саме вертикальні деформації. Горизонтальні елементи підсилення, виконані з геосинтетичних матеріалів, можуть відігравати роль шару розділення щебеневого баласту та суглинку земляного полотна. Навіть в комбінації геосинтетичних матеріалів з палями (варіант GRPS; див. рис. 1, д) георешітка, що розташована на оголовках паль, лише розділяє баласт, палі і ґрунт земляного полотна, дещо впливаючи на позитивний розподіл горизонтальних переміщень (Петренко, В. Д., Гузченко, Тютюкін, & Алхдур, 2010).

Підсилення земляного полотна шаром, що мало деформується, також недостатньо ефективно у випадку зменшення вертикальних деформацій, проте є позитивним саме збільшення деформаційних властивостей шару (модуль деформації, підвищений на відміну від суглинку в щебенево-піщаній суміші, бутовому камені або асфальтовому прошарку). Цей варіант є найбільш зрозумілим, оскільки він базується на простій залежності між переміщеннями і модулем деформації ґрунту земляного полотна. Тобто, якщо була б змога спорудження нової лінії із значенням модуля деформації 50...60 МПа на відміну від 35...40 МПа (за ЦП-0204, 2009), то потім проблема «хворого» земляного полотна не поставала б так гостро.

Найбільш цікавим є заанкерений варіант підсилення земляного полотна геотекстилем або георешіткою (див. рис. 3, в), що базується на комбінації з шаром із збільшеними деформаційними характеристиками (відпрацьований щебінь). На відміну від горизонтальних елементів підсилення, що працюють в розтягнутому стані, незамкнена оболонка з геосинтетичного матеріалу, заповненого ущільненим шаром, базується на розподілі горизонтальної і вертикальної компонент деформування і зарекомендувала себе під час експериментів як ефективна конструкція підсилення. Проте і її застосування мало ряд суттєвих недоліків.

З механізму деформування системи «рухомий склад – залізнична колія», навіть під час суміщення колій 1520 і 1435 мм, впливає те, що максимальне зниження вертикальної компоненти можливе лише під час застосування вертикальних елементів. Будь-які варіанти підсилення горизонтальними елементами не можуть бути ефективними в цій ситуації саме тому, що їх орієнтування в земляному полотні є перпендикулярним дії поїзного навантаження.

Таким чином, перша концепція (підсилення горизонтальними елементами) повинна замінюватися другою (підсилення вертикальними елементами) і третьою (підсилення комбінацією вертикальних і горизонтальних елементів), що притаманні практиці підсилення земляного полотна в Європейському Союзі. Реалізація другої концепції підсилення в Україні під час перевлаштування залізниці під суміщену колію потребує обґрунтування не самої ідеї, а її втілення, тобто теоретико-практичних питань методу підсилення.

Результати

Не викликає сумнівів, що неможливо обрати ідеальний метод підсилення земляного полотна українських залізниць для випадку перевлаштування під суміщену або європейську колію. Ставити задачу в такий спосіб некоректно, оскільки випадки підсилення вже існуючих і десятки років експлуатованих залізниць потребують конкретних рішень і впровадження найефективніших елементів підсилення.

Однак, розглянуті методи підсилення земляного полотна можна обґрунтувати, провівши ранжування за позитивними та негативними параметрами (Kendall, 1970), які характеризують ситуацію розміщення в ґрунтовій матриці елементів підсилення (табл. 1). Надана таблиця побудована на основі результатів аналізу літературних джерел і майже п'ятнадцятирічного досвіду теоретичних і практичних досліджень земляного полотна в стінах Українського державного університету науки і технологій (раніше – Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна). Параметри підсилення розділені на позитивні (зменшення горизонтальних та вертикальних деформацій) та негативні (параметри технології), відповідно ранг характеризує позитивний чи негативний вплив.

Ранжування елементів підсилення за 5-бальною шкалою

Елементи підсилення	Параметри підсилення			
	Позитивні		Негативні	
	Вплив на горизонтальні деформації, S_h	Вплив на вертикальні деформації, S_v	Технологічна складність влаштування, TD	Рівень втручання в земляне полотно, що експлуатується, LI
Геотекстиль	3	2	4	4
Георешітка	3	2	4	3
Шар, що мало деформується	2	2	3	4
Комбінація 1 (геотекстиль + шар, що мало деформується)	5	3	5	4
Вертикальні палі або мікропалі (<i>jet-grouting</i>)	3	5	3	2
Вертикальні палі або мікропалі (бурозмішувальна технологія)	3	5	2	2
Комбінація 2 (геосинтетичні матеріали + палі (<i>GRPS</i>))	4	5	5	5

Так, аналізуючи табл. 1, можна стверджувати, що застосування Комбінації 1 максимально позитивно впливає на зменшення горизонтальних деформацій, тобто застосування геотекстилю із загинами (анкерування) в комбінації з шаром, що мало деформується, доцільно для земляного полотна, яке працює з підвищеними горизонтальними силами (наприклад, в кривих). Проте, ранги технологічної складності ($TD=5$) та рівня втручання в земляне полотно ($LI=4$) свідчать про те, що потребуються значні капіталовкладення для перевлаштування.

Ранги технологічної складності можна визначити як: 1 – без втручання; 2 – робота в межах рейко-шпальної решітки і баласту; 3 – робота в межах рейко-шпальної решітки, баласту і частини земляного полотна; 4 – робота в межах рейко-шпальної решітки, баласту і частини земляного полотна, також пов'язана із особливими маніпуляціями з елементом підсилення; 5 – робота в межах рейко-шпальної решітки, баласту і частини земляного полотна, також пов'язана із особливими маніпуляціями з комбінацією різнорідних елементів підсилення.

Ранги рівня втручання в земляне полотно можна визначити як: 1 – без втручання; 2 – робота з рейко-шпальною решіткою; 3 – робота з рейко-шпальною решіткою і баластом, ремонт; 4 – робота з рейко-шпальною решіткою,

баластом і частиною земляного полотна, реконструкція; 5 – майже повна реконструкція.

Користуватися таблицею рангів (табл. 1) слід, задаючись рівнем можливостей перевлаштування, якому буде відповідати рівень позитивного впливу на деформований стан ґрунтової матриці. На даний термін процесу переходу з ширини колії 1520 мм до 1435 мм рівень можливостей диктується технологічною складністю влаштування (TD) при мінімальному рівні втручання в земляне полотно, що експлуатується (LI), та оптимальному рівні горизонтальних та вертикальних деформацій. Для цього треба вирішити одну із систем рівнянь, задавшись або рівнем впливу на деформований стан, або рівнем TD , або рівнем LI :

$$\left. \begin{array}{l} S_h=a; S_v=b; \\ TD=c; \\ LI \rightarrow \min; \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_h \rightarrow \max(h); S_v \rightarrow \max(v); \\ TD=d; \\ LI=e; \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_h \rightarrow \max(h); S_v \rightarrow \max(v); \\ TD=f; \\ LI=g, \end{array} \right\} \quad (3)$$

де a, b, c, e, f, g – ранги, що є початковими умовами рішення.

Якщо прийняти TD рівним $f=2\dots 3$, то, вирішив систему (3) при значенні LI , що дорівнює $g=2\dots 3$, максимальне значення позитивного впливу ($S_h=3$; $S_v=5$) надають варіанти вертикальних паль або мікропаль, створених на основі бурозмішувальної технології або *jet-grouting*.

Наукова новизна та практична значимість

Наукову новизну роботи складає те, що вперше на основі досвіду підсилення та формул ранжування за позитивними та негативними параметрами виконане обґрунтування концепції підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі.

Практична значимість полягає в тому, що будь-який метод підсилення до його реалізації може бути ранжований, тобто може бути визначена його ефективність та раціональність під час впровадження в конкретних ситуаціях 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 регламентовані «Правилами улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії» (ЦП-0204, 2009) варіанти підсилення земляного полотна геотекстилем або георешіткою, а також шаром, що мало деформується, а також розроблені і впроваджені в Європейському Союзі три концепції підсилення, що надали змогу з'ясувати напрямки розвитку українських залізниць, які експлуатуються наразі і потребують підсилення.

Крім того, отримані аналітичні матеріали мають своїм висновком, що максимальне зна-

чення позитивного впливу на зменшення вертикальних деформацій надають вертикальні елементи підсилення.

Подальший розвиток цього наукового напрямку вбачається в проведенні ранжування варіантів підсилення вертикальними палями або мікропалями, створеними на основі бурозмішувальної технології або *jet-grouting*. Тобто процес визначення рангів планується провести на рівні технологій із визначенням позитивних і негативних параметрів кожної з них.

Додатковим дослідженням, яке в комплексі з запланованим вище надасть інформацію про ефективність уведення вертикальних елементів в ґрунтову матрицю земляного полотна, є ранжування зміни їхнього положення, геометричних та деформаційних властивостей.

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.
- Briançon, L., & Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*, 24(3), 293-305.
- Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101.
- Hwang, T.-H., Kim, K.-H., & Shin, J.-H. (2017). Effective installation of micropiles to enhance bearing capacity of micropiled raft. *Soils and Foundations*, 57, 36-49.
- Kendall, M. G. (1970). *Rank correlation methods*. London: Charles Griffin.
- 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.
- 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), 1-10.
- Даніленко, Е. І. (2010). *Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом* (Том 2). Київ: Інпрес.
- Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, В. Д., & Тюткін, О. Л. (2023). Аналіз результатів випробування підсилення земляного полотна армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 45-53.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Курган, М. Б., Курган, Д. М., Бражник, М. Ю., & Ковальський, Д. Л. (2019). Особливості напружено-деформованого стану суміщеної залізничної колії. *Наука та прогрес транспорту*, 1(79), 51-63.
- Петренко, В. Д., Андрєєв, В. С., & Харченко, В. В. (2021). Порівняльний аналіз технологій влаштування мікропал під час підсилення слабких ґрунтових основ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 69-77.
- Петренко, В. Д., Гузченко, В. Т., Тютюкін, 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., Тютюкін, 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.
- ЦП-0204 (2009). *Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії*. Київ: Укрзалізниця. Головне управління колійного господарства.
- ЦП/0138 (2006). *Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України*. Київ: Транспорт.

О. І. DUBINCHYK^{1*}, V. A. MIROSHNYK², O. L. TIUTKIN³

^{1*} Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

² Department «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

³ 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

SUBSTANTIATION OF CONCEPTS OF SUBGRADE'S STRENGTHENING IN UKRAINE AND THE EUROPEAN UNION

Purpose. Substantiating the concepts of subgrade's strengthening in Ukraine and the European Union. In the work, based on the experience gained in the field of increasing the strength and stability of objects constructed from the soil, based on the ranking of parameters, the hypothesis about the greatest effectiveness of vertical strengthening elements, unlike all others, in the case of transition to a combined track (1520/1435 mm) is proven. **Methodology.** The options for strengthening the subgrade with geotextile or geogrid, as well as a rigid layer, are considered, as regulated by CP-0204 "Rules for the arrangement of the main subgrade site during major repair and modernization of the track". Three concepts of strengthening developed and implemented in the European Union with the help of: 1) geosynthetic materials; 2) vertical piles or micropiles; 3) combinations of geosynthetic materials with piles (Geosynthetic-Reinforced-Pile-Supported) are analyzed. **Findings.** The ranking of the methods of strengthening the subgrade was carried out according to positive and negative parameters that characterize the situation of placement of reinforcement elements in the soil matrix. Reinforcement parameters are divided into positive (reduction of horizontal and vertical deformations) and negative (technology parameters). It was determined that the maximum value of the positive impact on the reduction of vertical deformations is provided by options of vertical piles or micropiles created on the basis of Boring and Mixing Technology or Jet-grouting. **Originality.** For the first time, on the basis of the ranking formulas for positive and negative parameters, the justification of the concepts of subgrade's strengthening in Ukraine and the European Union was performed. **Practical value.** Any method of strengthening can be ranked before its practical implementation. That is, its efficiency and rationality can be determined during implementation in specific situations of railway operation, with subgrade that needs strengthening.

Keywords: subgrade, strengthening, stress-strain state, geosynthetic materials, soil cement, ranking of parameters

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)
- Briançon, L., & Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*, 24(3), 293-305. (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)
- Hwang, T.-H., Kim, K.-H., & Shin, J.-H. (2017). Effective installation of micropiles to enhance bearing capacity of micropiled raft. *Soils and Foundations*, 57, 36-49. (in English)
- Kendall, M. G. (1970). *Rank correlation methods*. London: Charles Griffin.
- 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)
- 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), 1-10. (in English)
- Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna kolia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaiemodii z rukhomym skladom* (Tom 2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2023). Analiz rezultativ vyprovuvannia pid-sylennia zemlianooho polotna armovanymy gruntotsementnymy paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 45-53. (in Ukrainian)
- Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., Brazhnyk, M. Yu., & Kovalskyi, D. L. (2019). Osoblyvosti napruzhenodeformovanoho stanu sumishchenoi zaliznychnoi kolii. *Nauka ta prohres transportu*, 1(79), 51-63. (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 zemlianooho 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 zemlianooho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnymy elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)
- TsP-0204 (2009). *Pravyla ulashtuvannia osnovnoi ploshchadky zemlianooho polotna pry vykonanni kapitalnoho remontu ta modernizatsii kolii*. Kyiv: Ukrzaliznytsia. Holovne upravlinnia koliiinoho hospodarstva. (in Ukrainian)
- TsP/0138 (2006). *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy*. Kyiv: Transport. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 01.07.2023.

Прийнята до друку 11.09.2023.