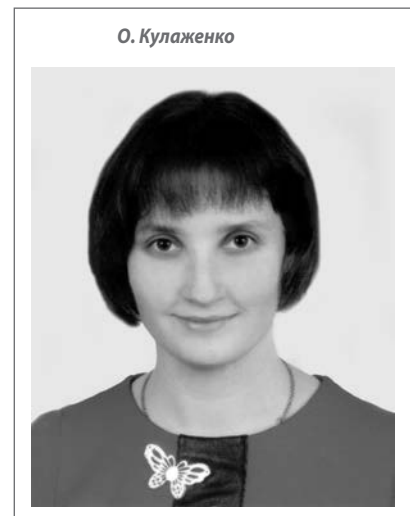


В. Петренко, д. т. н., професор,
О. Тютюкін, к. т. н., доцент,
О. Кулаженко, аспірант,
кафедра тунелів, основ та фундаментів, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна

ЛОТКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ АРМУВАННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ

КЛЮЧОВІ СЛОВА: геокомпозитні матеріали, залізнична колія, земляне полотно, лоткові дослідження.

УДК 625.12



При будівництві та реконструкції залізничної колії часто виникає необхідність вирішувати завдання підвищення несучої здатності ґрунтового земляного полотна та його підсилення або укріплення, у т. ч. шляхом армування.

У сучасних умовах при суттєвому підвищенні руху поїздів у всьому світі (зокрема, у Франції, Великобританії, Іспанії, Італії, Португалії, Японії та ін.) одним із найважливіших завдань в Україні є досягнення високих швидкісних показників. На сьогодні на першому етапі отримано завдання впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів до 200 км/год, вантажних — до 120 км/год. Такий варіант може бути реалізований на існуючих залізничних лініях, однак потребує більш істотної реконструкції, особливо земляного полотна, шляхом його укріплення, збільшення радіусів кривизни траси, удосконалення колійних пристроїв та штучних споруд.

Як зазначає проф. М. Б. Курган [1], конструкції колії з рейками довжиною в перегін і стрілочними переводами, з пружними скріпленнями рейок до залізобетонних шпал, укладених на щебеневому баласті, мають стати основними на ділянках із максимальною швидкістю руху поїздів до 200 км/год.

Разом із тим, базовою конструкцією залізничної колії є земляне полотно, яке потребує високого рівня підсилення при його реконструкції відповідно до завдання підвищення швидкості руху поїздів.

При будівництві та реконструкції залізничної колії часто виникає необхідність вирішувати завдання підвищення несучої здатності ґрун-

тового земляного полотна та його підсилення або укріплення, у т. ч. шляхом армування. Це означає використання в ґрунтових конструкціях спеціальних елементів, які дозволяють збільшувати механічні властивості ґрунту. Працюючи в контакті з ґрунтом, армуючі елементи перерозподіляють навантаження поміж ділянками конструкції, що забезпечують більш рівномірну передачу напружень. Такі елементи можуть бути виготовлені з різних матеріалів, які задовільно працюють на розтяг: метал, деревина, залізобетон, структури з полімерних волокон тощо. Концепція армування не є новою, але її застосування підтверджує ефективність методу в цілому [2]. Як відомо,

існують достатньо неординарні способи укріплення земляного полотна. В останні роки одним із найбільш перспективних у транспортному будівництві способів укріплення земляного полотна стало застосування різних видів геосинтетичних матеріалів (геотекстилі, геосітки, георешітки, геокомірки, геомати, геокомпозити різних видів). Геоматеріали широко використовуються в транспортному та цивільному будівництві багатьох країн (Великобританія, Німеччина, Франція, Швейцарія, Австрія, Італія, США, Росія, Україна) і добре зарекомендували себе при вирішенні великої кількості інженерних задач (рис. 1).

Одним із найбільш доступних будівельних матеріалів є ґрунт. Тому він завжди був популярний в інженерів-будівельників. Армований ґрунт, як будівельний матеріал, становить собою комбінацію ґрунту та арматури і має суттєво збільшені механічні властивості. Термін «армоґрунт» був уперше застосований французьким інженером Анрі Відалем у 1965 році для виконання армованих засипок підпірних стін [3]. При армуванні характеристики сипких ґрунтів, які мають достатню міцність на стиск та зсув, але їм не притаманна міцність на розтяг, можуть бути суттєво покращені шляхом введення елементів підсилення в напрямку дефор-

мацій розтягу таким же чином, як у залізобетоні. Особливо широко армоґрунт застосовується в конструкціях, що підтримують горизонтальні та похилі земляні насипи при спорудженні залізниць, підпірних споруд, стоянів та опор мостів у якості елементів підсилення. В останні роки в практиці будівництва найчастіше використовуються геосинтетичні матеріали.

Дослідженням особливостей роботи різних ґрунтових конструкцій, які армовані геоматеріалами, присвячені роботи таких видатних учених, як Г. М. Шахунянц, М. Н. Гольдштейн, Л. М. Тимофєєва, Л. С. Блажко, Є. В. Яковлева, Е. І. Даніленко, К. Д. Джоунс, А. Відаль та ін. [2–4].

Геосинтетики використовуються на залізницях із 1970-х років. Вони мають характеристики, які повністю відповідають технологічним вимогам на земляне полотно, основними з яких є значний опір механічним ушкодженням при укладанні, значним експлуатаційним навантаженням, висока зносостійкість та здатність зберігати робочі властивості протягом усього терміну служби. Сучасні геосинтетичні матеріали застосовуються на залізницях усіх держав Європи при будівництві й реконструкції колії, будівель і споруд різного призначення. Але найбільше розповсюдження геосинтетичні та геокомпозитні матеріали отримали в конструкціях земляного полотна. Зокрема, нетканий геотекстиль, на сьогодні найбільш розповсюджений серед геосинтетиків, становить основу дренажного ґрунту і в тілі насипів виконує сумісну роботу з баластним шаром і ґрунтом основної площадки земляного полотна. При цьому він виконує функції арматури підсилення, а також захисту різних шарів ґрунту при розподілі та пом'якшенні навантажень від рухомого складу.

Теоретичні та експериментальні дослідження в різних країнах, а також моніторинг стану дослідних ділянок дозволили встановити, що геотекстиль, який розміщений на основній площадці, вступає в сумісну роботу з баластним шаром та її ґрунтом. При цьому напружено-деформований стан масиву земляного полотна

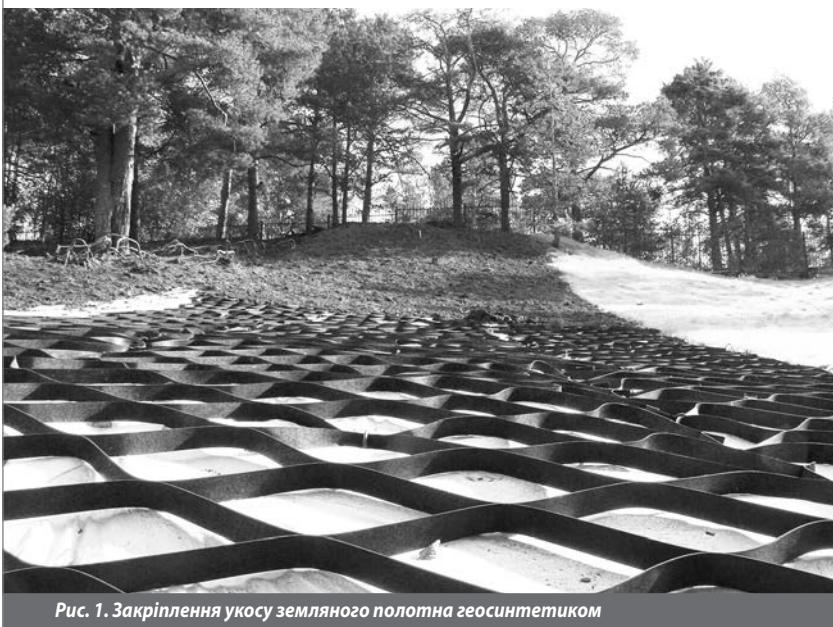


Рис. 1. Закріплення укосу земляного полотна геосинтетиком

змінюється. Дослідженнями, які наведені в роботі [4], установлено, що прошарок геотекстилю перешкоджає появі остаточних деформацій баласту, оскільки свобода переміщень окремих його частинок обмежується. Крім того, у цій же роботі визначено, що на міцність щебеневної баластної призми з геотекстилем найсуттєвіший вплив чинить міцність геотекстилю, але не тертя його по баласту, оскільки при їх взаємодії в геотекстилі з'являються дрібні пошкодження. Це викликає закріплення дрібних частинок щебеню, які прилягають до геотекстилю і створюють ефект «прилипання».

У низці робіт було показано, що розміщення елементів арматури, у т. ч. геотекстилю, на невеликих глибинах від підшви шпали не є раціональним, оскільки воно несуттєво підвищує міцність та стійкість земляного полотна в цілому.

Необхідно також зазначити, що вплив геотекстилю при різних глибинах його розміщення на напружено-деформований стан (НДС) земляного полотна вивчено недостатньо.

Як відомо, деякі з результатів виконаних раніше досліджень можуть вважатися фундаментальними [2; 3], але появу нових варіантів конструкцій підсилення земляного полотна геотекстилями й геосітками, залізобетонними плитами та спеціальними прошарками потребують проведення нових досліджень, оскільки принципи створення підсиленого земляного полотна дещо змінилися.

Численні типи елементів підсилення земляного полотна, які базуються не на зміні фізико-механічних властивостей ґрунту (шари підсилення), а на впровадженні арматури в ґрунтову матрицю, мають розроблені конструкції, але відсутні детальні дослідження їх впливу на НДС земляного полотна.

У наукових дослідженнях вже здавна широко застосовується метод моделювання, в основу якого покладена ідея створення моделей ґрунтових масивів та гірських порід зі штучних матеріалів, які є еквівалентними за своїми деформаційними та міцнісними властивостями натурним при прийнятному масштабі

моделювання. На сьогодні цей метод широко застосовується під назвою методу еквівалентних матеріалів. Його використання галузевими науково-дослідними та академічними інститутами й навчальними закладами показало, що він дозволяє вирішувати визначене коло задач, у т. ч. геомеханіки. Тому був виконаний комплекс модельних досліджень, метою яких було наукове обґрунтування доцільності та ефективності застосування низки конструктивних рішень при визначенні НДС моделі земляного полотна залізниці з геосинтетичними матеріалами та матеріалами, що мало деформуються (із щебенево-ґрунтової суміші — ЩГС), для підвищення несучої здатності та зменшення деформативності земляного полотна [4]. Головне полягає в тому, що була отримана оцінка ефективності їх використання для підсилення залізничної колії.

На сьогодні існують прилади й методи, які з різним ступенем точності дозволяють моделювати натурні умови роботи ґрунту земляного полотна. Порівняльний аналіз їх переваг та недоліків довів, що задовільні результати можуть бути досягнуті при дрібно масштабному моделюванні. Одним із найбільш поширених методів моделювання земляного полотна є проведення досліджень у ґрунтових лотках. Якщо скористатися цим методом, можна вносити суттєві доповнення до розрахунків та в багатьох випадках отримувати більш точні результати. Іноді цей метод дозволяє вирішувати достатньо складні завдання, які не піддаються опису ні аналітичним шляхом, ні за допомогою результатів натурних спостережень. При цьому при моделюванні в лотку звичайно використовують матеріал натури (рис. 2).

У ході експериментальних робіт були проведені дослідження на моделях земляного полотна в спеціальному лотку, причому вони армувалися різними видами геотекстилю та ЩГС і завантажувалися зусиллями, меншими та більшими за руйнуючі. Також установлювалося, який варіант характеризується найбільшою стійкістю, міцністю, стабільністю та є оптимальним для підсилення земляного полотна.

При проведенні експериментальних досліджень були прийняті такі положення моделювання:

— по-перше, був обраний визначений масштаб моделювання з урахуванням геометричної подоби для баластного шару та земляного полотна, який дорівнювався 1:20, тобто розміри цих елементів насипу були зменшені у 20 разів;

— по-друге, кінематична подоба в дослідженні не враховувалася, оскільки модель навантажували статичною вагою протягом визначеного періоду часу;

— по-третє, механічні характеристики моделі й натури, тобто міцнісні параметри ґрунтів і баластного шару (міцність на стиск, питоме зчеплення), а також деформаційні характеристики (модуль деформації) були близькі до механічних властивостей суглинків у тілі земляного полотна і щебеню, що укладається в баластному шарі.

Поїзд, який рухається, викликає динамічну дію, пульсацію напружень у ґрунтах земляного полотна та коливання частинок, на які накладаються коливання різних частин його рухомого складу. Змоделювати в точності такий процес на сьогодні достатньо складно та певною мірою для інженерної практики недоцільно. У такому випадку достатньо створити таку аналогію в стані ґрунту, яка буде враховувати основні умови його роботи в земляному полотні.

Оскільки при моделюванні ґрунтів земляного полотна складно досягнути подоби всіх процесів, то в експериментах, які були проведені, основна увага приділялася моделюванню деформованого стану ґрунту із забезпеченням дії статичних навантажень. Таким чином, моделювання взаємодії поїзного навантаження на земляне полотно необхідно здійснювати шляхом коригування його за допомогою коефіцієнта динамічності.

Для обґрунтування методу попередження або суттєвого зниження деформацій земляного полотна при різних видах армування було проведено комплекс експериментальних досліджень у лотку (рис. 3).

Висота лотка становить 250 мм, розміри в плані 680 × 120 мм, передня

стінка виконана з прозорого органічного скла, що надавало змоги спостерігати за розвитком деформацій. Завантаження моделей здійснювалося важільною системою, навантаження передавалося за допомогою важків на сталевий штамп площиною 155,3 см². У процесі завантаження моделей виконувався контроль рівня абсолютних переміщень. При цьому приріст вертикального навантаження змінювався від 10 до 50 Н, а величина напружень під штампом — від 0,064 до 0,322 МПа при нормативному напруженні 0,16 МПа під шпалою в земляному полотні залізниці.

Осідання штампу вимірювалося трьома індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм, які встановлювалися на штампі симетрично відносно центра його вертикальної поздовжньої площини. Переміщення штампу фіксувалися після прикладення кожного ступеня навантаження шляхом зняття за індикаторами відліків та фотографуванням моделі, що деформується. Переміщення земляного полотна визначалися за лініями, що були встановлені на бокових гранях лотка та за деформаціями моделі із сіткою, яка була нанесена на її лицьовому боці.

Було виконано декілька варіантів розташування геотекстилю при одношаровому армуванні. У першому варіанті геотекстиль укладався на основній площадці та зверху насипався баластний шар із щебеню. У подальшому геотекстиль укладався на глибині 2 см (0,4 м у натурних умовах). Крім того, було виконане армування одним геотекстилем із загинами, причому геотекстиль укладався на глибині 4 см (0,8 м у натурних умовах) від основної площадки, а потім покривався шаром суглинку й були зроблені загини на кінцях геотекстилю. Зверху також укладався шар суглинку товщиною 2 см (0,4 м у натурних умовах).

В іншому варіанті геотекстиль укладався на глибині 6 см (1,2 м у натурних умовах) від основної площадки, потім укладався шар суглинку товщиною 4 см (0,8 м у натурних умовах) і були зроблені загини на кінцях геотекстилю. Потім укладався шар суглинку товщиною 2 см (0,4 м у натурних умовах).

Було виконано декілька варіантів розташування геотекстилю при одно- та двошаровому армуванні. При цьому укладалися на різних глибинах як плоскі елементи геотекстилю, так й із загинами. Крім того, використовувалось укріплення моделі земляного полотна шаром, що мало деформується, із ЩГС у пропорції 70% щебеню та 30% суглинку. Був виконаний також варіант розміщення шару ЩГС у геотекстилі із загинами та повністю обгорнутий геотекстилем.

Після підготовки земляного полотна зверху насипався баластний шар у вигляді вузької подушки з дрібноподрібненого щебеню товщиною 0,4 м (у натурних одиницях), а потім установлювався штамп зверху баластного шару. Після цього здійснювалося встановлення індикаторів для вимірювання осідання штамп при навантаженні. Переміщення основи відмічалось з точністю до 0,1 мм, а осідання штамп — з точністю 0,01 м від кожного ступеня навантаження.

При деформуванні ґрунтової моделі, що не армувалася під штампом, було виявлено ядро стиску. Армування моделі одним полотном геотекстилю під баластним шаром дещо

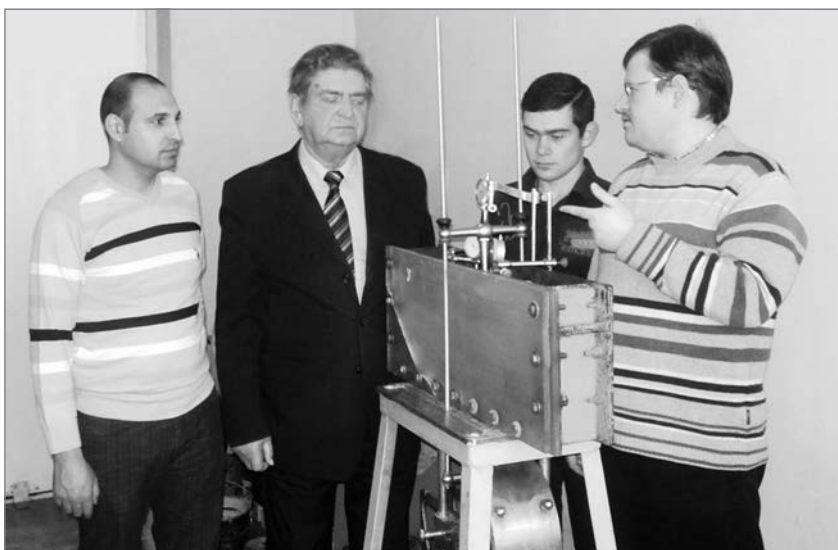


Рис. 2. Підготовка до лоткових досліджень

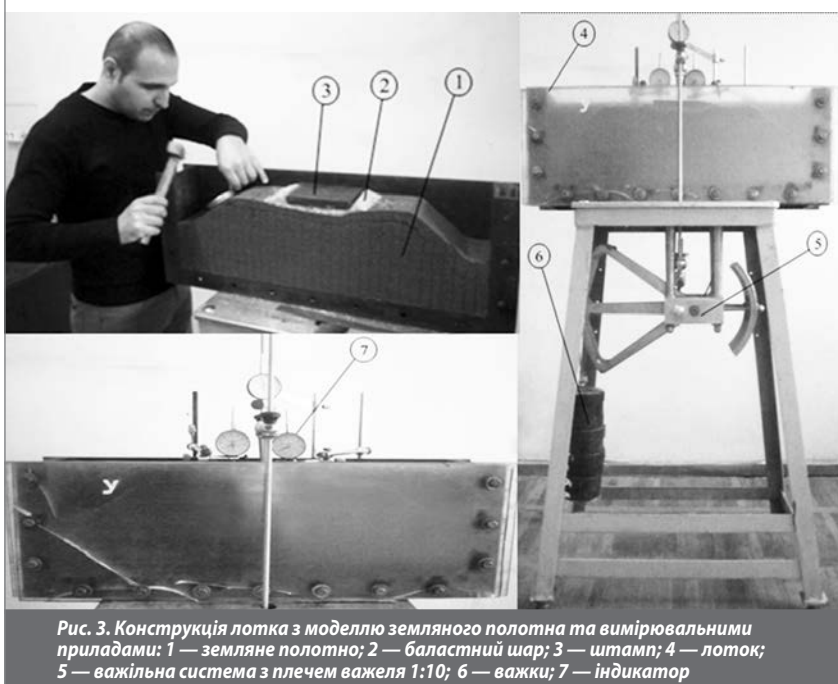


Рис. 3. Конструкція лотка з моделлю земляного полотна та вимірювальними приладами: 1 — земляне полотно; 2 — баластний шар; 3 — штамп; 4 — лоток; 5 — важільна система з плечем важеля 1:10; 6 — важки; 7 — індикатор

покращило картину деформування, але в процесі стиску ґрунтової матриці полотно геотекстилю суттєво змінило свою форму в результаті критичної деформації і відшарувалося від основної площадки.

У моделі, яка була армована одним полотном геотекстилю (варіант 1), що укладений на глибині 0,4 м від основної площадки, у результаті деформування при значних напруженнях на кінцях геотекстильного полотна створилися зони розшарування матриці та арматури, що було зумовлено процесом висмикування. Таке явище відмічалось в процесі навантаження моделі після формування ядра стиску під штампом і розвивалося до руйнування. Варіант 3 був досліджений у двох варіаціях. Так, варіація 3а мала вигляд незамкненої оболонки товщиною 0,4 м, яка розміщувалася на глибині 0,4 м під основною площадкою земляного полотна моделі. Для варіації 3б товщина шару ґрунту з незамкненою оболонкою становила 0,8 м у натурних умовах. При цьому для обох варіацій моделі у внутрішніх частинах над геотекстилем знаходився суглинок.

У випадку варіанта 4 виконувалось армування у вигляді двох незамкнених оболонок товщиною 0,4 м, які розміщувалися під основною площадкою земляного полотна моделі на глибинах 0,8 і 1,2 м. Деформування моделей за варіантами 3 і 4 можна характеризувати як однорідне, оскільки ніяких критичних деформацій у вигляді розшарування й висмикування не було виявлено. Таке армування у відповідності варіантів 3 і 4 є раціональним, оскільки ніяких критичних деформацій у вигляді розшарування й висмикування не було виявлено. Це зумовлено тим, що всередині незамкненої оболонки створюється зона переущільненого ґрунту, яка сприймає більшу частину деформацій ядра стиску, а загини не дозволяють висмикуватися арматурі. Крім того, рівномірне деформування неармованої моделі (варіант 0) зберігається у варіантах 3 і 4 якісно і покращується кількісно. Таким чином, запропонована конструкція є рівнонавантаженою та такою, що рівномірно деформується.

Замикання оболонки, яке здійснюється після формування геотекстильного полотна з його повним напуском у верхній частині оболонки (варіант 5 — модель, що армована геотекстильною оболонкою), що характеризується в теоретичних роботах [2] як оптимальне, у ході експериментальних досліджень не було підтверджено. Так, теоретично така оболонка формує всередині себе зону переущільненого ґрунту, а замкненість її контура запобігає висмикуванню геотекстильного полотна з матриці.

Аналіз отриманих при експериментальних дослідженнях напружень і деформацій показав, що всі варіанти армування значно (до 2 разів) збільшують міцність моделі. Разом із тим, найбільш суттєве збільшення міцності досягається у варіантах 3–5.

Виконавши ці експериментальні дослідження й отримавши важливу інформацію про НДС моделей із різними варіантами геотекстильного армування, можна зробити висновки про її подальший розвиток, який полягає в експериментальному дослідженні моделей з армуванням шарами підсилення земляного полотна іншими матеріалами, а не тільки геотекстилем. У зв'язку з цим був проведений комплекс лоткових досліджень за армування земляного полотна шаром ЩГС, який слабо деформується. Спочатку був проведений експеримент із неармованою моделлю. Характерним деформуванням неармованої моделі (варіант 0) був випадок стиску ґрунту з його випором, який визначався за викривленням сітки 2×2 см, що була накреслена на передньому боці моделі в лотку.

Підсилення моделі за варіантом 1 дещо покращило картину деформування, але незначно, що пояснюється недостатньою товщиною шару, що мало деформується (1 см у моделі і, відповідно, 0,2 м у натурних умовах). Його геометричні параметри ще не дозволяють суттєво зменшити вертикальні переміщення, але разом із тим, порівняно з варіантом із неармованим земляним полотном, їх згасання є значними, що підтверджує позитивний вплив такого шару армування.

Збільшивши товщину шару, що мало деформується, до 2 см (0,4 м у натурних умовах) було виявлено не тільки його позитивний вплив на зменшення вертикальних деформацій, але також і вплив його розташування за висотою на ці величини. Для цього варіанти 2 (шар із ЩГС товщиною 0,4 м, що розміщується безпосередньо під баластом), 3 (шар із ЩГС товщиною 0,4 м на глибині 0,8 м від основної площадки) та 4 (шар із ЩГС товщиною 0,4 м на глибині 1,2 м від основної площадки) були розглянуті в комплексі. Як встановлено дослідженнями, якісний вплив положення шару на зміну вертикальних переміщень не відзначався. Крім того, з аналізу загального деформування для всіх варіантів можна зробити висновок і про те, що кількісну зміну такого варіювання висоти також не було відмічено.

На основі проведених експериментальних досліджень можна визначити, що шар, який мало деформується, та проникнення в ґрунтову матрицю у вигляді геотекстилю по-різному впливають на НДС земляного полотна, хоча інтегрально їх вплив полягає в зменшенні його деформацій. Важливість визначення вказаних причин полягає в тому, що, провівши дослідження особливостей кожного зі способів підсилення або армування, можна сполучати фактори, які найбільше впливають на деформування земляного полотна, і створити їх комбінацію. Разом із тим, необхідно чітко розмежувати вплив шару, що мало деформується, і геосинтетичних матеріалів. На підставі виконаних досліджень можна зробити висновок, що шар, який мало деформується, через підвищення модуля деформацій (парціальний модуль деформації) знижує деформації системи взагалі та збільшує її протидеформаційні якості (інтегральний модуль деформації).

Разом із тим, таке збільшення здійснюється лише в шарі та в деякому його околі й базується лише на підвищенні деформаційних властивостей, але не на коефіцієнті тертя і питомому зчепленні. Такий шар деформується разом із матрицею, у яку він проник таким чином, що ніяких

розшарувань, тріщин і порушення цілісності моделі не спостерігається, на відміну від випадку армування геотекстилем. У цьому полягає позитивний ефект впливу такого шару. На відміну від шарів, проникнення геотекстильних матеріалів іноді призводить до ефектів деформування, які пов'язані з тим, що деформаційні властивості матриці та арматури значно відрізняються. Занурена арматура у вигляді полотен геотекстилю створює всередині земляного полотна додаткову конструкцію, у якій виникає власний НДС, що впливає на загальний НДС системи «матриця – арматура». Власний НДС арматури залежить від показників тертя й зчеплення з матрицею, а також від ступеня ущільнення матриці над і під арматурою.

Виконаними дослідженнями доведено, що проникнення арматури без будь-якого анкерування полотна не дає ніяких позитивних результатів, оскільки напруження розтягу в арматурі призводять до того, що полотно геотекстилю незворотно деформується та висмикується з матриці. Використання анкерування у вигляді загинів полотна надає йому нової властивості, яка полягає в тому, що арматура із загинами стає самонапруженою системою, ступінь самонапруження якої залежить від навантаження, що докладається до неї. Відповідно, сили тертя й зчеплення по нижній фібрі полотна вже не настільки значно впливають на власний стан арматури та інтегральний стан системи взагалі. Також меншу увагу можна приділяти напруженням розтягу в арматурі, оскільки рівень навантаження, що прикладається до земляного полотна, не відповідає межах міцності на розрив сучасних геосинтетичних матеріалів [4].

Найважливішим стає завдання поєднання позитивних властивостей шару та арматури — підвищення парціального модуля деформації й створення самонапруження. Тому були проведені експериментальні дослідження за варіантами 5 (шар із ЩГС товщиною 0,4 м на глибині 0,4 м від основної площадки, що загорнутий полотном геотекстилю із загина-

ми) і 6 (шар із ЩГС товщиною 0,4 м на глибині 0,8 м від основної площадки, що загорнутий полотном геотекстилю із загинами).

Інформація про використання комбінації геотекстилю та шару, який мало деформується, дозволила зробити висновки, що в наданих варіантах деформування були найменші.

Аналіз даних, що отримані в ході експериментальних досліджень, дозволив сформулювати такі висновки.

1. Застосування способу підсилення земляного полотна у вигляді шару, що мало деформується, є доцільним, оскільки невеликий розкид деформаційних властивостей шару та матриці виключає можливість будь-якого розшарування матриці й елементу армування.

2. З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що застосування елементу армування збільшує міцність моделі із суглинку на 20%, причому рівень деформацій зменшується в 1,2 рази.

3. Положення шару, що мало деформується, за висотою моделі в межах зони активного деформування суттєво не впливає на зниження вертикальних деформацій.

4. Характер деформування земляного полотна в комбінованих варіантах підсилення свідчить про те, що в них відбувається поєднання позитивних властивостей комбінації шару та арматури, оскільки підвищення деформаційних властивостей шару, який обгорнутий полотном геотекстилю, створює самонапружену систему й не дозволяє розшаровуватися арматурі й матриці. При цьому забезпечується найбільший опір навантаженню, що докладається до земляного полотна.

5. Армування земляного полотна у вигляді окремих полотен геотекстильних матеріалів без загинів збільшує міцність ґрунтової матриці в 1,5–1,6 рази, але виникнення зон розшаровування на кінцях полотна свідчить про нераціональність цих варіантів незалежно від їх розміщення за висотою матриці.

6. Армування земляного полотна, замкненого оболонкою з геотекстилю, також не може вважатися раціональним навіть при збільшенні

міцності в 1,6 рази, оскільки деформування земляного полотна при такому варіанті пов'язане з його значним тріщиноутворенням.

7. Дослідження впливу шару, який мало деформується, та арматури у вигляді геосинтетичних матеріалів із загинами [5] показали, що виникає підвищення напружень та зменшення деформацій у 2 рази, на відміну від неармованого земляного полотна. Тому використання комбінованого рішення є оптимальним.

8. Також раціональними варіантами армування є варіант із незамкненою оболонкою та варіант із двома незамкненими оболонками, оскільки було досягнуто збільшення міцності від 1,6 до 2 разів, а існування анкерування геотекстильних полотен виключає негативні ефекти деформування у вигляді активного тріщиноутворення й розшаровування матриці та арматури. ☞

■ Список літератури

1. Курган Н. Б. Впровадження швидкісного руху поїздів в Україні / Н. Б. Курган, І. П. Корженевич // Залізничний транспорт України. — 2005. — № 2. — С. 45–51.
2. Тимофеева Л. М. Армирование грунтов. Теория и практика. Ч. 1. Армированные основания и армогрунтовые подпорные стены / Л. М. Тимофеева. — Пермь, 1991. — 480 с.
3. Vidal, H. La terre armée / H. Vidal // L'Architecture d'Aujourd'hui, 1972. — № 3. — pp. 103–107.
4. Петренко В. Д. Результати аналізу параметрів експериментальних досліджень армування геотекстилем земляного полотна / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вісник ДНУЗТ, 2010. — Вип. 34. — С. 131–135.
5. Петренко В. Д. Спосіб укріплення земляного полотна / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, І. В. Петрівський // Патент на корисну модель № 75553 від 10.12.2012. — Бюл. № 23 від 10.12.2012.

Надійшло до редакції
09.03.2016 р.