

УДК 625.7./8

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.3>**Гаркуша Микола Васильович,**

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд
факультету транспортного будівництва,
Національний транспортний університет,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>
E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ УКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ У ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Анотація. Внаслідок збільшення інтенсивності дорожнього руху, виникає передчасне руйнування дорожнього одягу, що в свою чергу потребує значних витрат на ремонтні роботи. Однією з головних причин, являється збільшення вантажонапруженості, внаслідок того що на дорожній одяг часто діють навантаження значно перевищуючі її граничні. Отже, до дорожнього одягу та ґрунту земляного полотна повинні висуватися нові підвищені вимоги, щоб забезпечити нормальну експлуатацію автомобільної дороги, її довговічність та забезпечити безпеку руху.

Традиційні рішення з підвищення несучої здатності дорожнього одягу за рахунок потовщення його шарів не вирішує в повній мірі проблему підвищення загальної міцності дорожнього одягу, а отже і не забезпечує необхідної довговічності.

При зведенні земляного полотна автомобільних доріг в багатьох випадках використовуються місцеві слабкі ґрунти, заміна яких іншим ґрунтом є економічно недоцільною. Недостатні деформаційні показники, а також низька міцність призводить до виникнення в земляному полотні зсувів шарів відносно один одного, що в свою чергу спонукає виникнення на покритті різних пошкоджень та деформацій.

В роботі наведено аналіз історичних етапів розвитку укріплення ґрунтів. Проведено аналіз експериментальних досліджень впливу укріплення ґрунтів на підвищення їх фізико-механічних характеристик.

Ключові слова: довговічність, дорожній одяг, полімерні волокна, транспортне будівництво, укріплення ґрунтів, цемент.

Harkusha Mykola. APPLICATION OF SOIL REINFORCEMENT IN TRANSPORT CONSTRUCTION

Abstract. As a result of the increase in traffic's intensity, there is a premature destruction of road surface, which in turn requires significant costs for repair work. One of the main reasons is the increase in load tension, due to the fact that road clothing is often subjected to loads significantly exceeding its limit. Therefore, new, increased requirements must be placed on the road surface and subgrade soil to ensure the normal operation of the road, its durability and to ensure traffic safety.

Traditional solutions for increasing the load-carrying capacity of road surface by thickening its layers do not fully solve the problem of increasing the overall strength of road surface, and therefore do not provide the necessary durability.

In many cases, local weak soils are used for the construction of highway subgrades, the replacement of which with another soil is economically impractical. Insufficient deformation indicators, as well as low strength, lead to the occurrence of shifts of layers relative to each other in the subsoil, which in turn induces the occurrence of various damages and deformations on the coating.

The work provides an analysis of the historical stages of the development of soil strengthening. An analysis of experimental studies of the influence of soil consolidation on improving their physical and mechanical characteristics has been carried out.

Key words: durability, road surface, polymer fibers, transport construction, soil strengthening, cement.

Вступ. При створенні довговічних дорожніх одягів в нових умовах доводиться враховувати значні напруженні від зсуву в основі дорожнього одягу, що виникають від навантаження коліс велико вагових транспортних засобів.

В наслідок чого в усіх країнах світу широке розповсюдження отримали нежорсткі дорожні одяги з основою з кам'яних матеріалів та ґрунтів, укріпленими органічними і не органічними в'язучими речовинами.

В той час застосування укріплених шарів в конструкції дорожнього одягу дає можливість розподілити напруження над дорожніми водопрпусковими трубами.

Одним із надійних шляхів підвищення якості слабого ґрунту є покращення його властивостей шляхом введення різних стабілізуючих або укріплюючих добавок [1].

Аналіз історичних етапів розвитку. В 1936 р. в Англії [2] в графстві Ворчестершир, було вперше використано вапно для укріплення ґрунтів автомобільної дороги, яка обслуговувала нафтову базу в м. Лінкомбе. Автомобільна дорога знаходилася під впливом великовагових транспортних засобів, автомобілів з цистернами. Дані дослідження показали [2], що вапно в кількості (6 – 10)%, має кращий вплив на міцнісні характеристики цементоґрунту, ніж така сама кількість цементу на нього.

Вапно [2], також використовувалося при будівництві цементоґрунтової дороги в Бороу (Дартфорд), в кількості (1–2)% від маси ґрунту з додаванням (7–10)% портландцементу, попередні дослідження свідчили, що вапно зменшує пластичність та підвищує ущільнення ґрунтів.

В роботі Г. Е. Брук-Бредлі [2], що виконана в Англії, направлено вивчення впливу гумусових речовин та органічних кислот на міцність цементоґрунту та запровадження ряду заходів подолання цього впливу за рахунок внесення невеликої кількості вапна, хлористого кальцію та інших речовин.

Під час досліджень К. Е. Клера та А. Е. Поллерда [2], виявлено що значний вплив на міцність цементоґрунту має мінералогічний та хімічний склад цементу, а також генезис самого ґрунту.

Перша цементоґрунтова дорога в Німеччині [2] була побудована в 1943 р., в м. Лейпциг, на відміну від інших країн шар покриття укріплений цементом носив назву «цементоґрунтбетон», а також за перші п'ятнадцять років експлуатації на ній не з'явилося ні вибоїн, ні температурних тріщин.

До 1950 р. дороги в Швеції [2], 90% склалися з гравію, в цілях зменшення їх вологості і підвищенню опору до впливу води та руху

транспортних засобів, прийшли до висновку, що їх необхідно стабілізувати. Дослідів з укріплення ґрунтів цементом, було проведено досить мало, виключно як експерименти лабораторного характеру.

В Італії [2] до 60-тих років ХХ ст. практично не використовувалося укріплення ґрунтів, так як заважали погодні умови. Укріплення ґрунтів виконували, як правило, на невеликих ділянках, дуже часто на злітно-посадкових смугах аеродромів. Матеріалом для укріплення найпоширенішим був продукт вулканічного походження – туф, пуцолан.

Так, в Франції подібне вивчення використання цементу для укріплення ґрунтів і кам'яних дорожньо-будівельних матеріалів розпочато приблизно з 1953 р. [3], але в основному дослідження укріплення ґрунтів цементом, на той час, в Франції проводилося з ціллю експерименту, але не практичного впровадження. Не дивлячись на це, вже в 1963 р., були розроблені рекомендації для потреб дорожнього будівництва [3].

В 1967 р., вперше в Франції ґрунти почали укріплювати вапном, з того часу воно стало основним матеріалом для укріплення суглинистих та глинистих ґрунтів [4].

В більшості країн світу до 1971 року, основною характеристикою міцності матеріалу чи ґрунту укріпленого цементом, являлась його міцність на стиск на 7 чи 28 добу R_{cm} і в залежності від різних факторів становила від 1,7 МПа до 8 МПа.

В 1971 р. в Лондоні (Великобританія) відбулася конференція присвячена укріпленню ґрунтів цементом, під час якої розглядалося широке коло питань від проектування конструкцій та складів сумішей, до вимог пред'явлених матеріалам [5]. Було приділено увагу до показників міцності, що визначалися при випробуванні на стиск в віці 7 днів, які не дають достатньої інформації щодо матеріалу в дорожній конструкції. Значно більшу цікавість мало визначення показників міцності на розтяг при згині та модуль пружності, який в свою чергу залежить від типу вихідного матеріалу [5], а також поведінка матеріалу, укріпленого цементом, під час дії повторних навантажень.

В США [6] всі матеріали, укріплені цементом, розділяють на два класи: цементогрунт та грунт, покращений цементом. Ці матеріали мають вагому відмінність при дії на них прикладеного навантаження, цементогрунт має більший вміст в'язучого і працює як напівжорсткий матеріал, тоді як грунт укріплений цементом, як нежорсткий матеріал, подібно не укріпленому ґрунті.

До 70-х рр. XX ст. товщина шарів з оброблених цементом ґрунтів і матеріалів становила (15–25) см., в той час в США, Франції, Італії, Австрії, Іспанії, Швейцарії, і особливо, Нідерландах вона вже становила близько 40 см. [7].

Кількість цементу для гравійно-піщаних сумішей приймали (6–10)%, а інколи 12%.

Зменшення тріщиноутворення в дорожніх одягах, досягали внаслідок влаштування покриття з бітумо-мінеральних матеріалів товщиною: в Німеччині близько 30 см., в Швейцарії з асфальтобетону товщиною 18 см., в Великобританії (16–18) см., в країнах Скандинавії (10–20) см [8].

Для вибору товщин конструктивних шарів з укріпленням неорганічними в'язучими ґрунтів і матеріалів, в різних країнах використовували різні методи. Так, товщину шару основи з укріпленого цементом піску в штаті Каліфорнія (США) визначали за формулою [7]:

$$h = r \left[\frac{\alpha P}{\Delta k} \right]^{1/\beta}, \quad (1.1)$$

де Δ – допустима деформація; k – модуль деформації; P – граничний тиск; r – радіус чаші прогину; α та β – постійні, що залежать від товщини основи та модуля деформації ґрунту, визначаються за номограмою.

В Чехії [9], для визначення мінімальної товщини покриття отримало поширення використання графічних залежностей.

В ряді країн вибір конструкції дорожнього одягу з укріплених ґрунтів і матеріалів виконують на основі оцінки напружень та переміщень, що визначаються за допомогою рішень теорії пружності для шаруватого напівпростору, а також методів кінцевих елементів [10].

В Франції [2], першим методом розрахунку стабілізації ґрунту бітумом, був метод Хебарда-Фільда, та удосконалена різновидність даного методу – метод В.Р.С.Р. В першій половині XX ст. в Франції широко розповсюджувалося укріплення ґрунтів бітумом, так як транспортування цементу здорожувало вартість будівництва. В той час стабілізація ґрунтів в Франції проводилася потужними установками Барбер-Грін. Як правило, бітум розводили гасом, у співвідношенні 10:15, рідше 50:100.

Тривалий час в Франції, укріплені ґрунти прийнято було вважати при розрахунках, як ґрунти не укріплені, і приймати на одну категорію вище за «Каталогом типових конструкцій дорожнього одягу», так як укріплені ґрунти мали неоднорідні властивості [11].

В Україні Радовський Б. С. [12] досліджував цементогрунт на втомленість, свої дослідження проводили для чотирьох рівнів навантаження: 0,8; 0,7; 0,6 і 0,5 від динамічної міцності R_t , а тривалість дії повторних навантажень дорівнювала 0,1 с, а інтервал – 1,8 с.

За результатами досліджень [12] було побудовано подвійну логарифмічну координату $\lg \frac{\sigma}{R_t} - \lg N$ (рис. 1). На основі одержаних даних за методом добирали рівняння кривої втомленості:

$$\lg \frac{\sigma}{R_t} = -\frac{1}{n} \lg N \quad (1.2)$$

або у вигляді ідентичної залежності

$$N = \left(\frac{R_t}{\sigma} \right)^n, \quad (1.3)$$

де σ – максимальне напруження у зразку, що виникає при кожному циклі навантаження – розвантаження; R_t – границя міцності при динамічному навантаженні; n – константа, що залежить від витривалості матеріалу; N – число циклів до руйнування.

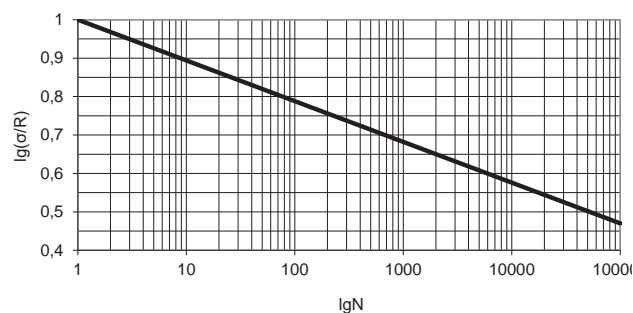


Рис. 1. Результати дослідження цементогрунту на втомленість

Значення n , розраховане за формулами 1.2, 1.3 на основі результатів досліджень бітумо-мінеральних сумішей на витривалість ($n = 5 \div 6$) [12] і цементно-бетонів ($n = 25 \div 30$) [12], для цементогрунту за чутливістю до багаторазового навантаження займає проміжне положення між ними. В результаті проектування дорожніх одягів з шарами укріпленими цементом ґрунту, запас міцності на втомленість його при інших рівних умовах необхідно приймати більш високим, ніж цементобетонів, але значно меншим, ніж у асфальтобетонів і бітумо-мінеральних сумішей [12].

На сьогоднішній день, в Україні мали широке застосування різноманітні добавки для стабілізації та укріплення ґрунтів: «СBR+» (ПАР), «ЕН – 1» (США), «LBS» (США) [1], «SPP» (ПАР), «Nanostab» (Німеччина) [88], «Nicoflok» (США), «Perigma-Zyme» (США), «Roadbond» (США) [1], «Roadpaker Plus» (Канада), «RRP-235-Special» (Німеччина), «Terrastone» (Німеччина), «Дорзин» (Україна) [1], «InfraCrete» (Швейцарія) [13], «RBI-81» (США), «ГРБ-1», «ГРБ-2», «ГРБ-3», «ГРБ-4», «ГРБ-5» (Україна), «СТ» (Україна), «Solitas» (США), «Renolit» (Австралія), «Силол – ґрунт» (Україна), «GEOSTA» (Польща) [14], «ECORoads» (США), «M10+50» (США) [14].

Результати виконаних досліджень ефективності RBI-81 [14] свідчать про те, що визначення межі міцності на розтяг при згині зразків 90-добового терміну твердіння у водонасиченому стані свідчать, що супісок піщанистий з добавкою 3% RBI-81 має міцність при стиску 0,2 МПа. Із збільшенням добавки RBI-81 міцність підвищувалася, і досягає 1,8 МПа при 9% RBI-81. Піски піщанисті при

добавці до них 3% RBI-81 характеризувався приблизно такою ж міцністю, що і супісок піщанистий – 0,18 МПа. В порівнянні з RBI-81, добавка 5% цементу, що характеризується вкрай незначною міцністю – (0,25–0,6) МПа, майже в 2 рази менша у порівнянні з RBI-81 – (0,45–0,85) МПа. Пояснюється це тим, що добавка RBI-81, більш повно насичує ґрунтові розчини в'язучою речовиною і створюються сприятливіші умови для формування міцної структури у порівнянні з цементогрунтом, в якому відбувається сильне поглинання катіонів кальцію з гідрату оксиду кальцію, що виділявся в розчин, перешкоджаючи тим самим утворенню міцного цементного каркасу.

Дослідження авторами [13] різних складів укріплення ґрунтів добавкою до цементу InfraCrete показали, що суттєво підвищується показник міцності. Зміна показників міцності ґрунтів укріплених цементом та добавкою InfraCrete підвищується на (5–45)%, залежить від кількості добавки та різновиду ґрунту, а також свідчить про можливість активного регулювання його властивостей в конкретних виробничих умовах.

Панасюк Я. І. [15] займався удосконаленням технології укріплення ґрунтів цементом для будівництва шарів дорожніх одягів підвищеної довговічності на основі встановлення закономірностей впливу різних добавок на процеси структуроутворення та їх властивості. Дослідження показали, що введення 0,05% поліпропіленових фіброволокон до цементогрунту різних марок підвищує значення границі міцності на розтяг при згині в (1,55–1,80) рази, а модуль пружності в (1,30–1,50) рази.

Введення в цементогрунт армуючих волокон із синтетичних матеріалів впливає на його фізико-механічні властивості і розрахункові характеристики, збільшує модуль пружності, міцність при вигині і розриві [16]. Характерно, що міцність зразків при стиску і їх морозостійкість при введенні синтетичних матеріалів знижуються як при великій, так і малої кількості цементу.

Аналіз експериментальних досліджень. В роботі проведено визначення границі міц-

ності при стисканні [17, 18]. Випробування зразків-балочок на розтяг при згині проводилися на розривній машині при швидкості навантаження (100 ± 0,3) мм/хв, за температури 10 °С [17, 18]. Визначення модуля пружності асфальтобетонних зразків у лабораторних умовах при температурі 20 °С проводилися за короткочасно діючими навантаженнями зразків-балочок. [17, 18].

Визначені показники міцності досліджуваних складів укріплених ґрунтів показали, що в залежності від кількості добавки (як цементу так і цемент + волокон) їх можна суттєво збільшити чи знизити.

Результати визначення межі міцності на розтяг при згині ґрунтів укріплених різними добавками наведено на рис. 2, 3.

Результати щодо залежності міцності на розтяг при згині від часу твердіння при 5% портландцементу (ПЦ) для піску та різній кількості волокон (рис. 2), можна сказати наступне, що на 28-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 4%, 6%, 12%, 5% відповідно; при 9% ПЦ вища на 2%, 5%, 11%, 4% відповідно; при 13% ПЦ вища на 2%, 3%, 9%, 5% відповідно. Результати щодо залежності міцності на розтяг при згині від часу твердіння при 5% ПЦ для супіска та різній кількості волокон (рис. 3), можна сказати наступне, що на 28-му добу в порівнянні з

контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 6%, 22%, 37%, 15% відповідно; при 9% ПЦ вища на 3%, 6%, 17%, 10% відповідно; при 13% ПЦ вища на 4%, 12%, 16%, 8% відповідно.

Аналізуючи отримані результати щодо залежності міцності на стиск від часу твердіння при 5% ПЦ для піску та різній кількості волокон (рис. 4), можна сказати наступне, що на 7-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 13%, 24%, 18%, 10% відповідно; на 28-му добу вища на 3%, 6%, 9%, 1% відповідно; на 90-ту добу на 2%, 7%, 12%, 1% відповідно. Результати залежності міцності на стиск від часу твердіння при 5% ПЦ для супіску та різній кількості волокон (рис. 5), на 7-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 14%, 26%, 38%, 22% відповідно; на 28-му добу вища на 9%, 26%, 41%, 28% відповідно; на 90-ту добу на 18%, 52%, 61%, 49% відповідно.

Аналізуючи отримані результати щодо залежності міцності на стиск від часу твердіння при 9% ПЦ для піску та різній кількості волокон (рис. 6), можна сказати наступне, що на 7-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полі-

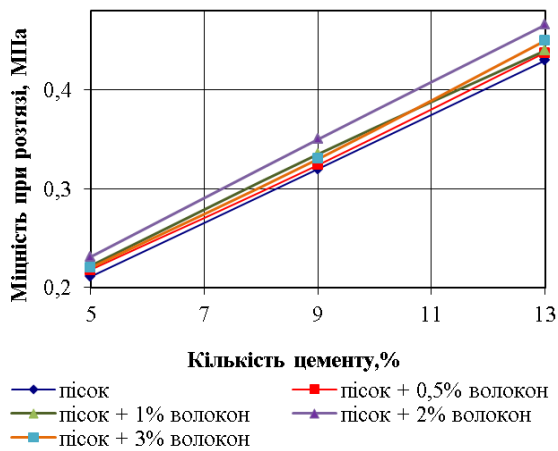


Рис. 2. Залежність міцності на розтяг при згині від кількості ПЦ на 28-му добу, контрольні зразки та зразки «цемент + волокна» (пісок)

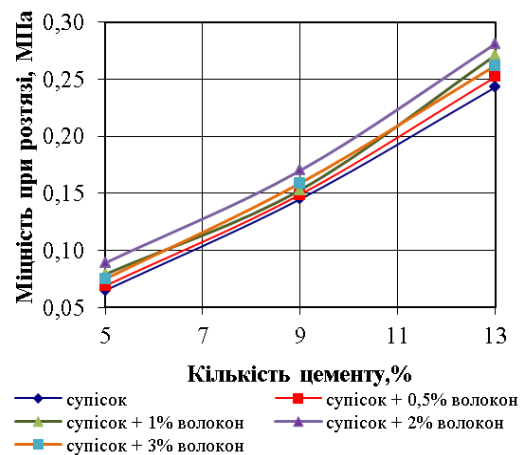


Рис. 3. Залежність міцності на розтяг при згині від кількості ПЦ на 28-му добу, контрольні зразки та зразки «цемент + волокна» (супісок)

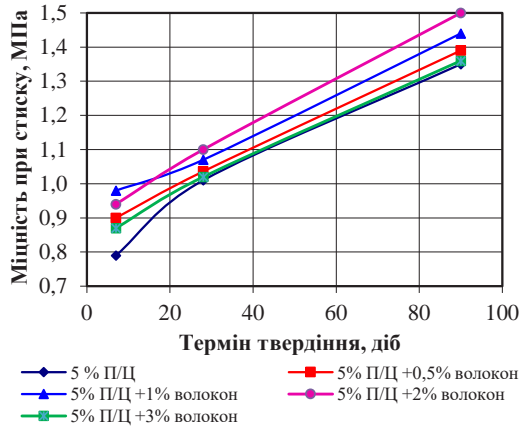


Рис. 4. Залежність міцності на стиск від часу твердіння при 5% ПЦ та різній кількості волокон (пісок)

мерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 4%, 11%, 17%, 18% відповідно; на 28-му добу вища на 4%, 9%, 12%, 7% відповідно; на 90-ту добу на 3%, 12%, 15%, 4% відповідно. Результати залежності міцності на стиск від часу твердіння при 9% ПЦ для супіску та різній кількості волокон (рис. 7), на 7-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 5%, 39%, 64%, 35% відповідно; на 28-му добу вища на 6%, 23%, 28%, 23% відповідно; на 90-ту добу на 8%, 43%, 68%, 48% відповідно.

Порівнюючи отримані результати щодо залежності міцності на стиск від часу твердіння при 13% ПЦ для піску та різній кількості волокон (рис. 8), можна сказати наступне,

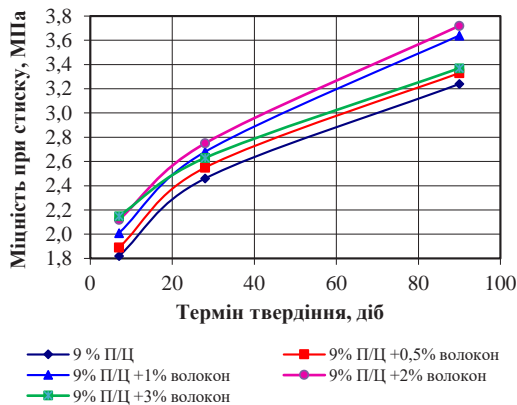


Рис. 6. Залежність міцності на стиск від часу твердіння при 9% ПЦ та різній кількості волокон (пісок)

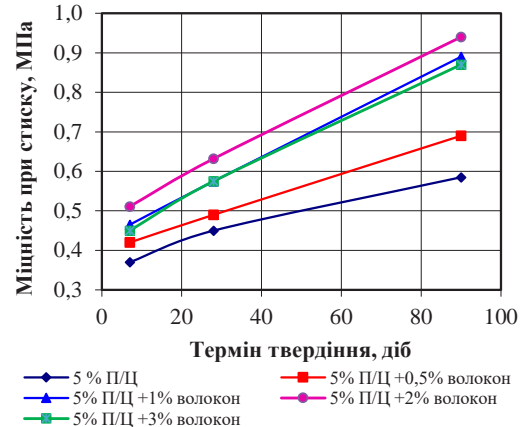


Рис. 5. Залежність міцності на стиск від часу твердіння при 5% ПЦ та різній кількості волокон (супісок)

що на 7-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1% без зміни, для 2% волокон міцність вища на 3%, а для 3% волокон від маси цементу, міцність знизилася на 8% в порівнянні з еталоном; на 28-му добу вища на 4%, 8%, 12%, 5% відповідно; на 90-ту добу на 2%, 5%, 6%, 1% відповідно. Результати залежності міцності на стиск від часу твердіння при 13% ПЦ для супіска та різній кількості волокон (рис. 9), на 7-му добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 6%, 11%, 21%, 7% відповідно; на 28-му добу вища на 6%, 13%, 21%, 10% відповідно; на 90-ту добу на 8%, 36%, 52%, 27% відповідно.

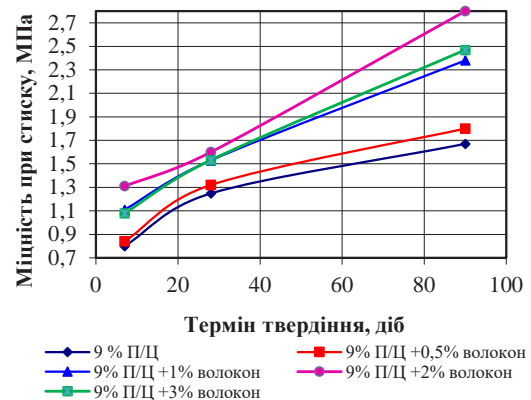


Рис. 7. Залежність міцності на стиск від часу твердіння при 9% ПЦ та різній кількості волокон (супісок)

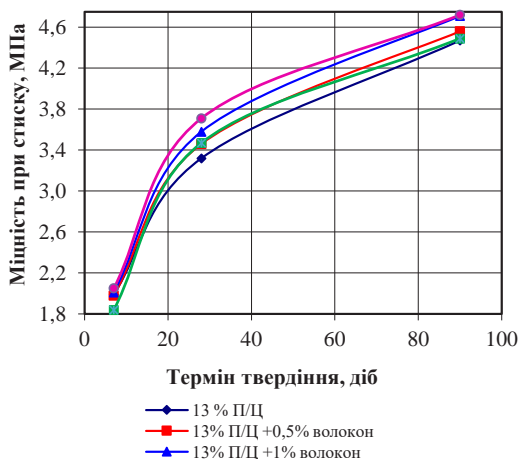


Рис. 8. Залежність міцності на стиск від часу твердіння при 13% ПЦ та різній кількості волокон (пісок)

Результати визначення модуля пружності досліджуваних зразків наведені в таблиці 1.

Отримані результати випробувань матеріалів шарів основи за допомогою важільного пресу дозволили визначити на основі отриманих даних залежності переміщень матеріалів

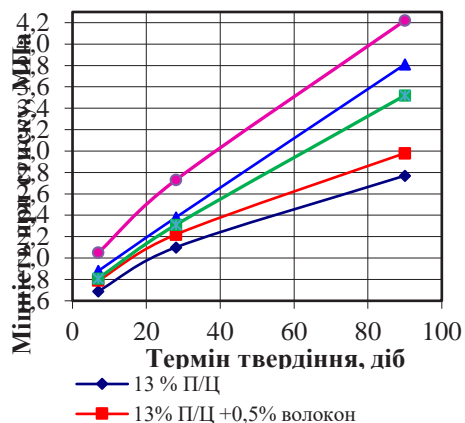


Рис. 9. Залежність міцності на стиск від часу твердіння при 13% ПЦ та різній кількості волокон (супісок)

основи при заданій вологості та різному часу дії навантаження визначити параметри функцій релаксації та модуля деформації. Результати параметрів наведено в таблиці 2.

Висновки. У багатьох регіонах країни у цей час широку виробничу перевірку прохо-

Таблиця 1

Результати визначення модуля пружності укріпленого ґрунту

Шифр	Кількість в'язучого	Модуль пружності піску, E, МПа	Модуль пружності супіску, E, Мпа
I	цемент – 5%	298	108
I.0.5	цемент – 5% + 0,5% волокон	303	109
I.1	цемент – 5% + 1% волокон	313	111
I.2	цемент – 5% + 2% волокон	319	118
I.3	цемент – 5% + 3% волокон	300	107
II	цемент – 9%	438	224
II.0.5	цемент – 9% + 0,5% волокон	452	239
II.1	цемент – 9% + 1% волокон	460	273
II.2	цемент – 9% + 2% волокон	509	314
II.3	цемент – 9% + 3% волокон	462	243
III	цемент – 13%	628	359
III.0.5	цемент – 13% + 0,5% волокон	632	386
III.1	цемент – 13% + 1% волокон	677	498
III.2	цемент – 13% + 2% волокон	716	536
III.3	цемент – 13% + 3% волокон	672	356

Таблиця 2

Параметри функції релаксації та коефіцієнт в'язкопластичності матеріалів

Шифр матеріалу	Параметри функції релаксації				Коефіцієнт в'язкопластичності k
	Emt, МПа	Edt, МПа	β	χ	
1	2	3	4	5	6
Укріплений ґрунт, М 60	540	490	6,1	4,1	0,98– 0,96
Пісок середній	138	125	9,0	3,75	0,94– 0,88
Суглинок	70	49	5,8	2,1	0,91– 0,83

Примітка: Коефіцієнт пластичності для матеріалу шарів залежить від вологості

дять конструктивні шари дорожніх одягів із ґрунтів, що укріплені комплексним методом з використанням в якості основного або допоміжного в'язучого великої кількості побічних продуктів виробництва.

Отримані експериментальні результати щодо залежності міцності на розтяг при згині від часу твердіння при 5% ПЦ для супіска та різній кількості волокон, встановлено, що на 90-ту добу в порівнянні з контрольним зразком міцність при додаванні полімерних волокон від маси цементу

в кількості 0,5%, 1%, 2%, 3% вища на 4%, 11%, 26%, 20% відповідно; при 9% ПЦ вища на 4%, 14%, 24%, 12% відповідно; при 13% ПЦ вища на 8%, 14%, 28%, 28% відповідно.

Отримані результати свідчать про ефективність застосування укріплених ґрунтів в конструктивних шарах дорожнього одягу в транспортному будівництві для підвищення фізико-механічних характеристик та збільшення довговічності самої конструкції дорожнього одягу.

Список використаних джерел:

1. Гаркуша М.В. Методи стабілізації та укріплення ґрунту / А.М. Онищенко, М.В. Гаркуша. Дороги і мости : Збірник наукових праць. К. : ДП «ДерждорНДІ», 2010. № 12. С. 145–149.
2. Сайт організації «Світова асоціація автомобільних магістралей» (ПІАРК) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.piarc.org/en/activities/World-Road-Congresses-World-Road-Association/Congress-Proceedings/Istanbul-1955/proceedings.htm>
3. Cadier P. L'utilisation des graves-ciment. *Revue générale des routes et des aérodromes*. 1970. Vol. 40, No. 460. P. 64–65.
4. Sikka R. P. Use of lean concrete for road bases. *Indian Concrete Journal*. 1972. Vol. 46, No. 10. P. 409–412.
5. Williams R. I. T. Properties of Cement Stabilized Materials. *Journal Institution of Highway Engineers*. 1972. Vol. 14, No 2, P. 5–19.
6. Woodfield P. R. Recent developments in the design of cement stabilized paraments in the USA. *N.Z. Concrete Construction*. 1972. Vol. 16, No 2, P. 22–23.
7. Nielsen J. Thickness design procedure for cement-treated sand bases. *Journal of the Highway Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1968. No 2, P. 141–159.
8. Solter W. A local authority material engineer's approach. *Journal of the Institution of Highway Engineers*. 1972. Vol. 19, No 3, P. 12–14.
9. Pospisil F. Kritische belagsdicke auf zementverfestigten tragschichten. *Straßen- und Tiefbau*. 1973. Vol. 27, No 6, P. 417–424.
10. Han H. C. S., Hirst T. J., Fang H. Y. Determination of the Elastic moduli of Flexible pavement Components. *Highway Research Record*. 1972. № 407, P. 36–38. URL: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1972/407/407-004.pdf>
11. Ragueneil A., de Puig J., Corbin M., Gestin M. Bilan du traitement des limons a'la chaux et a'la chaux-ciment en Normandie. *REV GEN ROUTES AERODR*. 1973. Vol. 43, No 490, P. 59–71.
12. Радовський Б.С. Проблеми механіки дорожньо-будівельних матеріалів та дорожнього одягу. К. : ТОВ «ПоліграфКонсалтинг», 2003. 240 с.
13. Онищенко А.М. Підвищення фізико-механічних властивостей ґрунту при використанні добавки Infra Crete. А.М. Онищенко, І.Ю. Лозовська, О.О. Макарчев. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2009. № 77. С. 48–55.
14. Бесараб О.М. Оцінка впливу добавки в ґрунт RBI-81 на підвищення довговічності дорожнього одягу. О.М. Бесараб, В.В. Смолянець, К.В. Шевченко. *Автошляховик України*. 2007. № 4. С. 37–41.
15. Панасюк Я.І. Удосконалення технології укріплення ґрунтів цементом для будівництва автомобільних доріг: дис. ...кандидата техн. наук : 05.22.11. Харків : ХНАДУ, 2013. 180 с.
16. Гаркуша М.В. Удосконалення методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії : дис. ...кандидата техн. наук : 05.22.11. Київ : НТУ, 2019. 186 с.
17. Ґрунти, укріплені в'язучим. Методи випробувань : ДСТУ Б В.2.7-309:2016. [Чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіон України, 2016. 32 с. (Національні стандарти України).
18. Суміші, укріплені гідравлічним в'язучим. Технічні умови. Частина 15. Ґрунти, стабілізовані гідравлічним в'язучим : ДСТУ EN 14227-15:2021 (EN 14227-15:2015, IDT). [Чинний від 2022-09-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 23 с. (Національні стандарти України).

References:

1. Onyshchenko, A.M., & Harkusha, M.V. (2010). Metody stabilizatsiyi ta ukriplennya gruntu [Methods of soil stabilization and consolidation]. *Dorohy i mosty*, 12, 145–149 [in Ukrainian].
2. Cayt orhanizatsiyi «Svitova asotsiatsiya avtomobil'nykh mahistraley» (PIARK) [Site of organization «Permanent International Association of Road Congresses» (PIARC)]. Retrieved from <https://www.piarc.org/en/activities/World-Road-Congresses-World-Road-Association/Congress-Proceedings/Istanbul-1955/proceedings.htm> [in Ukrainian].
3. Cadier, P. (1970). L'utilisation des graves-ciment. *Revue générale des routes et des aérodromes*. Vol. 40, No. 460. P. 64–65.
4. Sikka, R.P. (1972). Use of lean concrete for road bases. *Indian Concrete Journal*. Vol. 46, No. 10. P. 409–412.
5. Williams, R.I.T. (1972). Properties of Cement Stabilized Materials. *Journal Institution of Highway Engineers*. Vol. 14, No 2, P. 5–19.
6. Woodfield, P.R. (1972). Recent developments in the design of cement stabilized paraments in the USA. *N.Z. Concrete Construction*. Vol. 16, No 2, P. 22–23.
7. Nielsen, J. (1968). Thickness design procedure for cement-treated sand bases. *Journal of the Highway Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. No 2, P. 141–159.
8. Solter, W. (1972). A local authority material engineer's approach. *Journal of the Institution of Highway Engineers*. Vol. 19, No 3, P. 12–14.
9. Pospisil, F. (1973). Kritische belagsdicke auf zementverfestigten tragschichten. *Straßen- und Tiefbau*. Vol. 27, No 6, P. 417–424 [in German].
10. Han, H.C.S., Hirst, T.J., & Fang, H.Y. (1972). Determination of the Elastic moduli of Flexible pavement Components. *Highway Research Record*. № 407, P. 36–38. Retrieved from: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1972/407/407-004.pdf>
11. Ragueneil, A., de Puig, J., Corbin, M., & Gestin, M. (1973). Bilan du traitemen des limons a'la choux et a'la chaux-ciment en Normandie. *REV GEN ROUTES AERODR*. Vol. 43, No 490, P. 59–71 [in French].
12. Radovs'kyi, B.S. (2003). *Problemy mekhaniky dorozhn'o-budivel'nykh materialiv ta dorozhn'oho odyahu [Problems of the mechanics of road construction materials and road clothing]*. Kyiv: TOV «PolihrafKonsaltnyn» [in Ukrainian].
13. Onyshchenko, A.M., Lozovs'ka, I.Yu., & Makarchev, O.O. (2009). Pidvyshchennya fizyko-mekhanichnykh vlastyivostey hruntu pry vykorystanni dobavky Infra Crete [Increasing the physical and mechanical properties of the soil when using the Infra Crete additive]. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo – Automobile roads and road construction*, 77, 48–55 [in Ukrainian].
14. Besarab, O.M., Smolyanets', V.V., & Shevchenko, K.V. (2007). Otsinka vplyvu dobavky v hrunt RBI-81 na pidvyshchennya dovhovichnosti dorozhn'oho odyahu [Evaluation of the effect of RBI-81 soil additive on increasing the durability of road clothing]. *Avtozhlyakhovyk Ukrayiny – Avtslyakhovyk Ukrainy*, 4, 37–41 [in Ukrainian].
15. Panasyuk, Ya.I. (2013). Udoskonalennya tekhnolohiyi ukriplennya gruntiv tsementom dlya budivnytstva avtomobil'nykh dorih [Improvement of the technology of strengthening soils with cement for the construction of highways]. *Candidate's thesis*. Kharkiv: KHNADU [in Ukrainian].
16. Harkusha, M.V. (2019). Udoskonalennya metodu otsinky stiykosti pokryttya nezhorstkoho dorozhn'oho odyahu do utvorenniya koliyi [Improving the method of evaluation of the stability of coverage of non-rigid pavement to rutting]. *Candidate's thesis*. Kyiv : NTU [in Ukrainian].
17. Grunty, ukripleni v"yazhuchym. Metody vyprobuvan' [Soils reinforced with a binder. Test methods]. (2016). *DSTU B V.2.7-309:2016 from 1st January 2017*. Kyiv: Minrehion Ukrayiny [in Ukrainian].
18. Sumishi, ukripleni hidravlichnym v"yazhuchym. Tekhnichni umovy. Chastyna 15. Grunty, stabilizovani hidravlichnym v"yazhuchym [Mixtures reinforced with a hydraulic binder. Specifications. Part 15. Soils stabilized by hydraulic binders]. (2021). *DSTU EN 14227-15:2021 (EN 14227-15:2015, IDT) from 1st September 2022*. Kyiv: DP «UkrNDNTS» [in Ukrainian].