

© Т. А. Терещенко, канд. хім. наук, провідний науковий співробітник, e-mail: chemistry@dorndi.org.ua, ORCID: 0000-0001-7584-9031;
© С. І. Ілляш, завідувач відділу, e-mail: sergillyash@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3001-8012
(ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна»)

© Tatiana Tereshchenko, PhD, Senior Research Officer, e-mail: chemistry@dorndi.org.ua, ORCID: 0000-0001-7584-9031;
© Serhii Illiash, Chief of Department, e-mail: sergillyash@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3001-8012
(N.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise)

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ГРУНТІВ, СТАБІЛІЗОВАНИХ ГІДРАВЛІЧНИМ В'ЯЖУЧИМ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ

CLASSIFICATION AND APPLICATION OF SOILS STABILIZED WITH HYDRAULIC BINDER IN ACCORDANCE WITH EUROPEAN STANDARDS

Анотація. Грунти, які належать до найбільш широко застосовуваних дорожньо-будівельних матеріалів, переважно потребують регулювання технологічних та/або механічних властивостей. Згідно зі світовим досвідом дорожнього будівництва, найбільш ефективним методом регулювання властивостей є обробка ґрунтів гідралічними в'язучими з дотриманням оптимальної вологості суміші. Такі суміші, ущільнені належним чином, тужавіють та тверднуть внаслідок реакції гідралічного в'язучого з утворенням стабілізованих ґрунтів. Класифікація та технічні вимоги до ґрунтів, стабілізованих гідралічним в'язучим, встановлені системою європейських стандартів, надають широких можливостей застосування таких матеріалів з урахуванням умов їх роботи в конструкції дорожнього одягу.

Розроблення українських стандартів, ідентичних до європейських, щодо ґрунтів, стабілізованих гідралічним в'язучим, дасть змогу підвищити строк служби дорожніх одягів та знизити обсяг витрат під час ремонтів дорожнього одягу, пов'язаних із деформаціями земляного полотна. Відповідно до викладеного вище у статті розглянуто класифікацію та застосування ґрунтів, стабілізованих гідралічними в'язучими відповідно до вимог європейських стандартів.

Згідно з системою європейських стандартів стабілізовані ґрунти класифікуються як суміші, укріплені гідралічним в'язучим, на які поширюються вимоги європейського стандарту EN 14227, Частина 15. Для забезпечення відповідності стандартним вимогам ґрунти мають бути оброблені стандартним гідралічним в'язучим (або комбінацією таких в'язучих): цементом, шлаком, золою-виношенням, вапном, або має бути застосовано стандартне дорожнє гідралічне в'язуче.

Склад і методи виготовлення (ущільнення) зразків ґрунтів, стабілізованих гідралічним в'язучим, забезпечують отримання матеріалів різних класів міцності при стиску, де матеріал найбільш високої категорії характеризується міцністю при стиску зразків-кубів не менше ніж 12 МПа. Європейські стандарти встановлюють також класифікацію ґрунтів, стабілізованих гідралічним в'язучим, за показником міцності при розтягненні R_t у сполученні з модулем пружності E , відповідно до чого стабілізовані ґрунти підрозділяють на п'ять категорій від T1 до T5. Європейські стандарти встановлюють також класифікацію свіжовиготовлених сумішей за показником несучої здатності після ущільнення. Цей показник визначає можливість відкриття руху транспорту після ущільнення шару. Проте для ґрунтів, стабілізованих цементом, на об'єктах, де не передбачено відкриття руху транспорту раніше ніж 7 діб, цей показник дозволено не нормувати.

Виготовлення стабілізованих сумішей змішуванням на дорозі передбачає заходи зі зменшення ризику отримання невідповідної суміші або невідповідного за своїми параметрами шару – може бути встановлений підвищений вміст в'язучого або забезпечується підвищення товщини шару.

Ключові слова: ґрунти, стабілізовані гідралічним в'язучим; класифікація; міцність при стиску; міцність при розтягненні; влаштування шару

Аннотация. Грунты, относящиеся к наиболее широко применяемым дорожно-строительным материалам, в большинстве случаев требуют регулирования технологических и/или механических свойств. В соответствии с мировым опытом в отрасли дорожного строительства наиболее эффективным методом регулирования свойств является обработка грунтов гидравлическими вяжущими при соблюдении оптимальной влажности смеси. Такие смеси, надлежащим образом уплотненные, схватываются и твердеют вследствие реакций гидравлического вяжущего с образованием стабилизированных грунтов. Классификация и технические требования к грунтам, стабилизированным гидравлическим вяжущим, установленные системой европейских стандартов, предоставляют широкие возможности использования таких материалов с учетом условий их работы в конструкции дорожной одежды.

Разработка украинских стандартов, идентичных европейским стандартам относительно грунтов, стабилизированных гидравлическим вяжущим, позволит повысить срок службы дорожной одежды и уменьшит объем расходов при ремонтах дорожной одежды, связанных с деформациями земляного полотна.

На основании изложенного выше, в статье рассмотрены классификация и применение грунтов, стабилизированных гидравлическими вяжущими в соответствии с требованиями европейских стандартов.

В соответствии с системой европейских стандартов стабилизированные грунты классифицируются как смеси, укрепленные гидравлическими вяжущими, на которые распространяются требования европейского стандарта EN 14227, Часть 15. Для обеспечения соответствия стандартным требованиям грунты следует обрабатывать стандартными гидравлическими вяжущими (или комбинацией таких вяжущих): цементом, шлаком, золой-уносом, известью, или необходимо использовать стандартное дорожное гидравлическое вяжущее.

Состав и методы изготовления (уплотнения) образцов грунтов, стабилизированных гидравлическим вяжущим, обеспечивают получение

материалов разных классов прочности при сжатии, где материал самой высокой категории характеризуется прочностью при сжатии образцов-кубов не менее 12 МПа. Европейские стандарты устанавливают также классификацию грунтов, стабилизированных гидравлическими вяжущими, по показателю прочности при растяжении R_t в сочетании с модулем упругости E , в соответствии с чем стабилизированные грунты подразделяют на пять категорий от T1 до T5.

Европейские стандарты устанавливают также классификацию свежееизготовленных смесей по показателю несущей способности после уплотнения. Этот показатель определяет возможность открытия движения транспорта после уплотнения слоя. Однако для грунтов, стабилизированных цементом, на объектах, где не предусмотрено открытие движения транспорта раньше чем через 7 дней, этот показатель разрешается не нормировать.

Изготовление стабилизированных смесей смешением на дороге предусматривает меры по снижению риска получения несоответствующей смеси или несоответствующего по своим параметрам слоя – может быть установлено повышенное содержание вяжущего или обеспечивается повышение толщины слоя.

Ключевые слова: грунты, стабилизированные гидравлическим вяжущим; классификация; прочность при сжатии; прочность при растяжении; устройство слоя

Abstract. Soils being the most widely used materials for road building industry predominantly contribute the improvement of their mechanical and/or technological properties. Relating to the world-wide experience in road building industry, the most effective method for such improvement is treatment of soils with hydraulic binder under optimum water content. Those mixtures being properly compacted set and harden by hydraulic reaction and give stabilized soils. Requirements and classification of hydraulically stabilized soils established by European standards provide wide possibilities for soils application considering their performance in pavement layers. The elaboration of Ukrainian standards identical to the European standards relating hydraulically stabilized soils should permit the elongated life cycle of pavement and also will decrease expenses on repairs of road pavements caused by deformation of sub-grade.

This article reviews classification and application of hydraulically stabilized soils according to the requirements of European standards.

In accordance with European standards, stabilized soils are classified as hydraulically bound mixtures which properties are covered by Specifications on Hydraulically Bound Mixtures (European Standard EN 14227, Part 15). To conform the standard requirements soils should be treated by standard hydraulic binder (or a combination thereof): cement, slag, fly ash, lime, or a standard hydraulic road binder should be applied.

Composition and methods of manufacturing (compaction) of specimens of hydraulically stabilized soils give several strength classes of stabilized materials with the highest category characterized by the cubes compressive strength not less than 12 MPa. European standards establish also classification of hydraulically stabilized soils by tensile strength R_t in combination with elastic modulus E ; according to that classification the stabilized materials are divided into five categories from T1 to T5. European standards establish also classification of fresh mixtures by immediate bearing index. This value determines the suitability of a compacted layer to support the immediate trafficking. Nevertheless, that requirement may not cover cement-stabilized mixtures for construction of layers which are not intended to be trafficked for 7 days.

The in-situ manufacture of stabilized mixtures needs some measures to minimize the inadequacy of properties of a material, or geometry of a layer such as an increased proportion of a binder or an increased layer thickness.

Keywords: hydraulically stabilized soils, classification, compressive strength, immediate bearing index, construction of a layer.

Вступ

Ґрунти належать до найбільш широко застосовуваних дорожньо-будівельних матеріалів, які, водночас, суттєво різняться за походженням та складом та в більшості випадків потребують регулювання технологічних та/або механічних властивостей. Згідно зі світовим досвідом дорожнього будівництва, найбільш ефективним та широко впровадженим методом підвищення механічних характеристик ґрунтів є обробка гідрравлічними в'язучими з подальшим твердненням ущільненого матеріалу за стандартних умов.

Для обробки ґрунтів, залежно від їх генезису, використовують гідрравлічні в'язучі з переліку: цемент, гранульований (або мелений гранульований) доменний шлак, золу-виношення, вапно, а також комбінації цих в'язучих. В окремих випадках – переважно з метою підвищення технологічності та ущільнювальності – ефективною є індивідуальна обробка глин вапном.

Згідно із системою європейських стандартів ґрунти, які оброблені в'язучими матеріалами з наведеного переліку, ідентифікуються як стабілізовані ґрунти та належать до класу сумішей, укріплених гідрравлічним в'язучим. Класифікація та технічні вимоги до ґрунтів, стабілізованих гідрравлічним в'язучим, встановлені системою європейських стандартів, надають широкі можливос-

ті застосування таких матеріалів з урахуванням умов їх роботи в конструкції дорожнього одягу.

Розроблення та впровадження національних стандартів, ідентичних до європейських норм, що встановлюють вимоги та методи випробувань ґрунтів, стабілізованих гідрравлічним в'язучим, дасть змогу підвищити строк служби дорожніх одягів та знизити обсяг витрат під час ремонтів та реконструкції, пов'язаних з усуненням дефектів або руйнувань земляного полотна.

Відповідно до викладеного вище, у статті розглянуто особливості класифікації та застосування ґрунтів, стабілізованих гідрравлічним в'язучим (далі – стабілізовані ґрунти) відповідно до технічних вимог, встановлених системою європейських стандартів.

Основна частина

Класифікація та вимоги до ґрунтів, стабілізованих гідрравлічним в'язучим відповідно до положень європейських стандартів

Згідно із системою європейських стандартів ґрунти, стабілізовані гідрравлічним в'язучим, визначаються як стабілізована суміш ґрунту та води, яка тужавіє та твердне внаслідок реакцій гідрравлічного в'язучого [1].

Згідно з положеннями [1], стабілізації гідрравлічними в'язучими підлягають ґрунти, що характеризуються категорією S_i , де i є розміром

вічок сита, крізь яке проходить не менше ніж 95 % випробуваного ґрунту¹; водночас повинні виконуватися вимоги щодо однорідності та класифікації вихідних ґрунтів, чинні в місці використання. Можливість використання вихідних ґрунтів, які містять органічні речовини, сульфідів або сульфатів, визначають шляхом випробування стабілізованих сумішей на відповідність вимогам стандарту [1] у процесі підбору складу стабілізованого ґрунту.

Стандарт [1] встановлює вимоги до свіжовиготовленої суміші ґрунту, гідравлічного в'язучого та води (за необхідності – також до добавок) за показниками:

- вміст води (вологість);
- ступінь дезагрегації;
- показник несучої здатності після ущільнення;
- ступінь зволоженості.

Зазначені показники, а також термін збереження легкоукладальності свіжовиготовленої суміші нормують за необхідності, залежно від виду ґрунту, виду в'язучого, а також умов застосування суміші.

Вміст води в свіжовиготовлених сумішах нормують для забезпечення їх ущільнювальності на місці укладання, а також потрібних механічних характеристик стабілізованих ґрунтів. Відповідно до вмісту води свіжовиготовлені суміші класифікують за показником W ; приклади стандартної класифікації сумішей за цим показником згідно з [1] наведено в **табл. 1**.

Таблиця 1

Приклад класифікації свіжовиготовлених сумішей за вмістом води

Мінімальний вміст води	Категорія
0,9 значення оптимальної вологості суміші, визначеного при ущільнюванні згідно з вибраним методом [2–5]	$W_{0,9}$
...	...
1,05 значення оптимальної вологості суміші, визначеного при ущільнюванні згідно з вибраним методом [2–5]	$W_{1,05}$

Під час класифікації свіжовиготовлених сумішей за показником W виконують випробування з визначання вологості для досягнення еталонної щільності суміші з ущільнюванням одним із методів: за методом Проктора [2], вібростисканням [3], вібраційним молотком [4] або на вібраційному столі [5].

Ступінь дезагрегації суміші визначають згідно з [6] для суміші зв'язного ґрунту з вапном та/або

цементом, золою-винесенням, доменним шлаком. Ступінь дезагрегації дає змогу характеризувати суміші за вмістом зерен певного розміру та, наприклад, виділяти грубодисперсні та тонкодисперсні суміші під час проектування складу стабілізованого зв'язного ґрунту. Приклади стандартної класифікації сумішей за категорією P , яка ураховує ступінь дезагрегації, згідно з [1], наведено в **табл. 2**.

Таблиця 2

Приклад класифікації свіжовиготовлених сумішей за ступенем дезагрегації

Ступінь дезагрегації	Категорія
$\geq 30 \%$	P_{30}
...	...
$\geq 60 \%$	P_{60}
Задеклароване значення (Declared Value)	P_{DV}

Значення цього показника нормують за необхідності, оскільки для механічних характеристик стабілізованого ґрунту визначальним є загальний гранулометричний склад суміші.

Показник несучої здатності після ущільнення IBI (Immediate Bearing Index) визначають згідно з [7]. Свіжовиготовлені суміші класифікують за категорією показника несучої здатності IP ; приклади стандартної класифікації сумішей за цим показником згідно з [1] наведено в **табл. 3**.

Таблиця 3

Приклад класифікації свіжовиготовлених сумішей за показником IP

Показник несучої здатності після ущільнення	Категорія
≥ 10	IP_{10}
...	...
≥ 25	IP_{25}
...	...
Задеклароване значення (Declared value)	IP_{DV}

Класифікація суміші за показником IP дає змогу визначати можливість відкриття руху транспорту по шару суміші безпосередньо після ущільнення. Національні нормативні документи країн ЄС можуть встановлювати додаткові вимоги до механічних характеристик стабілізованих ґрунтів з погляду на забезпечення несучої здатності шару матеріалу. Так, у документі [8] для ґрунтів, оброблених цементом, золою-винесенням або шлаковим в'язучим, встановлюється категорія IP_{25} для

¹ Цей показник дозволяється не встановлювати.

матеріалів, які не призначені для безпосереднього транспортного навантажування (*direct trafficking*).

Ступінь зволоженості суміші *MCV* (*Moisture Condition Value*) визначають згідно з [9]; приклади стандартної класифікації сумішей за цим показником згідно з [1] наведено в **табл. 4**.

Таблиця 4

Приклад класифікації свіжовиготовлених сумішей за показником MCV

Значення діапазону вологості	Категорія
6 мінімум, 10 максимум	$MCV_{6/10}$
...	...
9 мінімум, 13 максимум	$MCV_{9/13}$
Задекларовані значення (Declared Values)	MCV_{DV}

Нормоване значення ступеню зволоженості суміші повинне забезпечувати її ущільнювальність. Оцінювання результатів випробувань із визначання ступеню зволоженості здійснюють за допомогою аналізу графічної залежності зміни penetрації (зміни глибини занурення трамбівки у стандартну форму з пробою ґрунту) від кількості ударів. Метод випробування з визначання ступеню зволоженості згідно з [9] є також застосовним для сумішей на основі заповнювачів (ґрунтів), здатних до подрібнювання в процесі ущільнення, проте у цьому випадку кількість ударів трамбівки є пропорційною до енергії, необхідної не тільки для ущільнювання суміші, але й для подрібнювання зерен.

Згідно з [8] під час влаштування шару стабілізованого ґрунту показник *MCV* визначають за остаточного перемішування та ущільнювання суміші, а для сумішей на основі зв'язних ґрунтів – також у процесі витримування – наприклад, для глин, оброблених вапном.

На відміну від свіжовиготовлених сумішей, стабілізовані ґрунти класифікують відповідно до значень:

- каліфорнійського показника несучої здатності (*CBR*, *California Bearing Ratio*);
- міцності при стиску R_c ;
- комбінації R_p , E міцності при розтягненні R_t та модуля еластичності E ;
- міцності після занурення у воду;
- набухання (лінійного та об'ємного).

Показник *CBR* стабілізованих ґрунтів визначають відповідно до [7]¹. Класифікацію стабілізованих ґрунтів за показником *CBR* згідно

з [1] здійснюють після кондиціонування у захищеному від висихання стані та додаткового насичування у воді; тривалість періодів кондиціонування та насичування встановлюють окремо. Приклади стандартної класифікації стабілізованих ґрунтів за показником *CBR* згідно з [1] наведено в **табл. 5**.

Таблиця 5

Приклад класифікації стабілізованих ґрунтів за каліфорнійським показником несучої здатності

Вимоги щодо CBR після 4-х діб насичення	Категорія
≥ 5	CBR_5
...	...
≥ 12	CBR_{12}
≥ 15 , сумісно з показником несучої здатності після ущільнення	CBR_{15}
...	...
≥ 40 , сумісно з показником несучої здатності після ущільнення	CBR_{40}
...	...

Класифікацію за показником R_c здійснюють відповідно до результатів стандартних випробувань із визначання міцності зразків-циліндрів або зразків-кубів при одноосьовому стиску, з урахуванням розмірів зразка. Окремі стандартні класи стабілізованих ґрунтів за міцністю при стиску R_c згідно з [1] наведені в **табл. 6**.

Таблиця 6

Приклад класифікації стабілізованих ґрунтів за показником міцності при стиску

Значення R_c для зразків-циліндрів ^a , МПа, не менше ніж	Значення R_c для зразків-циліндрів ^b та зразків-кубів, МПа, не менше ніж	Клас R_c
0,15	0,2	$C_{0,15/0,2}$
...
1,2	1,5	$C_{1,2/1,5}$
...
9	12	$C_{9/12}$
Задеклароване значення (Declared Value)	Задеклароване значення (Declared Value)	C_{DV}
^a Відношення висоти зразків-циліндрів H до діаметру D : $H/D=2$.		
^b Відношення висоти зразків-циліндрів H до діаметру D : $H/D=1$.		

¹ На відміну від показника *IBI*, який характеризує несучу здатність матеріалу безпосередньо після ущільнення, показник *CBR* характеризує несучу здатність матеріалу після витримування за певних умов або після ущільнення.

Класифікацію за показником R_c , E здійснюють відповідно до результатів випробувань з визначання міцності при розтягненні R_c та модуля пружності E , де міцність при розтягненні визначають випробуванням зразків-циліндрів прямим розтягненням або непрямим розтягненням (розколюванням в торець). Відповідно модуль пружності визначається при випробуванні на стиск або прямим розтягненням, або при непрямому розтягненні. Класифікацію стабілізованих ґрунтів за показником R_c , E здійснюють згідно з [1] відповідно до граничних кривих категорій T1 – T5 (рис. 1, табл. 7).

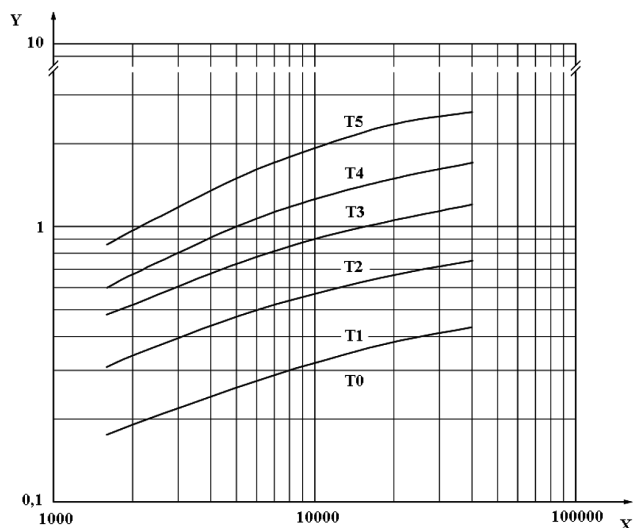


Рис. 1. Класифікація стабілізованих ґрунтів за показником R_c , E : Y – міцність при прямому розтягненні R_c , МПа; X – модуль еластичності E , МПа (див. пояснення таблиці 7)

Таблиця 7

Пояснення до класифікації стабілізованих ґрунтів за показником R_c , E , рисунок 1

E , МПа	2000	5000	10000	20000	40000
Нижня границя категорії	R_c , МПа				
T5	0,97	1,50	1,93	2,35	2,60
T4	0,67	1,00	1,26	1,49	1,70
T3	0,52	0,73	0,90	1,05	1,20
T2	0,34	0,47	0,57	0,67	0,75
T1	0,19	0,26	0,32	0,38	0,43

Примітка. Наведені значення R_c та E використані для створення кривих, що обмежують категорії.

Розглянуті вище стандартні методи класифікації стабілізованих ґрунтів – за показником R_c та за показником R_c , E – є рівноцінними. Класифікація за показником R_c є більш поширеною, проте класифікація за показником R_c , E встановлює режим моделювання, більш наближений до експлуатаційних властивостей стабілізованих ґрунтів [8].

Класифікацію стабілізованих ґрунтів за міцністю після занурення у воду здійснюють відповідно до значень відношення R_i/R , де R_i є усередненим значенням міцності зразків після «х» діб витримування в герметичному вигляді з подальшим витримуванням впродовж «у» діб з повним зануренням негерметизованих зразків у воду, та R є усередненим значенням міцності зразків після (х + у) діб витримування в герметичному вигляді. Приклади стандартної класифікації стабілізованих ґрунтів відповідно до міцності після занурення у воду згідно з [1] наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Приклад класифікації стабілізованих ґрунтів за міцністю після занурення у воду

Відношення R_i/R	Категорія
$\geq 0,6$	$I_{0,6}$
...	...
$\geq 0,8$	$I_{0,8}$
Задеклароване значення (Declared value)	I_{DV}

Лінійне набухання зразків визначають у процесі визначання CBR; насичування зразків водою виконують впродовж всього періоду, протягом якого триває набухання [1].

Стандартну класифікацію стабілізованих ґрунтів відповідно до лінійного набухання згідно з [1] наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Стандартна класифікація стабілізованих ґрунтів за лінійним набуханням

Середнє максимальне набухання зразків, мм	Максимальне набухання будь-якого окремого зразка, мм	Категорія
5	10	LS_5
1	2	LS_1
Задеклароване значення (Declared Value)	Задеклароване значення (Declared Value)	LS_{DV}

Об'ємне набухання стабілізованих ґрунтів визначається окремим стандартним методом та не повинне перевищувати 5 %, проте за наявності відповідних результатів випробувань і досвіду у кожному окремому місці використання дозволяється також застосовувати стабілізовані ґрунти, для яких об'ємне набухання дотримано у межах до 10 % включно [1].

Окремі положення стандарту [1] поширюються на міцність стабілізованих ґрунтів, яка має забезпечувати несучу здатність при безпосередньому навантажуванні технологічним транспортом (*direct construction trafficking*). Цей показник регулюється правилами, чинними в кожному місці використання; значення показника становить, з урахуванням можливих негативних впливів під час проходження транспорту, (1,0 – 1,5) МПа.

Морозостійкість стабілізованих ґрунтів також нормується і визначається правилами, чинними в кожному окремому місці використання. Європейським Комітетом Стандартизації (*Comité Européen de Normalisation, CEN, www.cen.eu*) розроблено технічні умови щодо визначання морозостійкості сумішей, укріплених гідравлічним в'язучим, зокрема стабілізованих ґрунтів; ці технічні умови мають позначку CEN/TS (*CEN Technical Specifications, позначка та номер: CEN/TC 13286-54:2014*)) та діють як документ, прирівняний до регіонального стандарту.

Особливості застосування положень європейських стандартів щодо ґрунтів, стабілізованих гідравлічним в'язучим, під час проектування та будівництва нежорсткого дорожнього одягу

Згідно з положеннями європейських нормативних документів, стабілізовані ґрунти застосовують під час влаштування основи, додаткової основи та перекриваючих шарів дорожнього одягу [10 – 12].

Застосування стабілізованих ґрунтів передбачено положеннями щодо проектування дорожніх одягів, впровадженими англійськими колегами [12]. Згідно з [12], основа дорожнього одягу (*Foundation*) розглядається як еквівалентний напівпростір, деформаційні характеристики якого представлені модулем на поверхні основи (*FSM, Foundation Surface Modulus*); значення FSM є значенням модуля жорсткості, отриманого за умови певного навантаження. Потрібно окремо зазначити, що відповідно до прийнятої в [12] методології проектування за основу (*Foundation*) беруться всі шари дорожнього одягу, розташовані під асфальтобетонним або цементобетонним покриттям; при цьому напруження, що виникають на поверхні шару земляного полотна, у розрахунок не беруться [13].

Відповідно до цих положень основа дорожнього одягу з урахуванням деформаційних характеристик класифікується за чотирма класами (*Foundation Classes*):

- Клас 1 $FSM \geq 50$ МПа;
- Клас 2 $FSM \geq 100$ МПа;
- Клас 3 $FSM \geq 200$ МПа;
- Клас 4 $FSM \geq 400$ МПа.

Застосування стабілізованих ґрунтів передбачено під час влаштування основи дорожнього одягу класу 1 та класу 2 [12].

Основа класу 1 виконує виключно функцію перекриваючого шару³ дорожнього одягу, який влаштовується з неукріплених сумішей підібраного зернового складу, або з сумішей, укріплених гідравлічним в'язучим, зокрема стабілізованих ґрунтів [12]. Основа класу 1 приймається згідно з [8, 12] під час проектування та будівництва автомобільних доріг з низькою інтенсивністю руху транспортних засобів, за умови сумарної кількості прикладень еквівалентного навантаження $N \leq 20$ msa (*million single axles*), де еквівалентне навантаження на одну вісь становить 80 кН.

Основа дорожнього одягу класу 2 виконує функцію додаткової основи або додаткової основи з перекриваючим шаром [12]. Основа класу 2 передбачає влаштування шару матеріалів, оброблених в'язучим, зокрема ґрунту, стабілізованого цементом, класу міцності не менше ніж $C_{3/4}$. Вміст цементу у стабілізованих ґрунтах повинен становити [8]:

- не менше ніж 3 % – під час виготовлення матеріалів змішуванням в установці з дозуванням компонентів за масою;
- не менше ніж 4 % – під час виготовлення матеріалів змішуванням в установці з дозуванням компонентів за об'ємом або під час виготовлення змішуванням на дорозі.

Вимоги до стабілізованих ґрунтів розглянутого цільового призначення згідно з [8] наведено в **табл. 10**.

Під час визначення міцності після занурення у воду значення «х» та «у» становлять 14 діб кожне за температури кондиціонування та випробування (20 ± 2) °С; зразки після кондиціонування повинні бути неушкодженими, без ознак розтріскування або набухання.

Основа класу 2 приймається згідно з [8, 12] під час проектування та будівництва автомобільних доріг з сумарною кількістю прикладень еквівалентного навантаження $N \leq 80$ msa, або більше – якщо товщина укріпленого шару такої основи становить не менше ніж 150 мм.

Основу дорожнього одягу класу 3 проєктують з кам'яних матеріалів, укріплених гідравлічним в'язучим, класу міцності за умови стиску не менше ніж $C_{8/10}$. Основу дорожнього одягу класу 4 про-

Вимоги до стабілізованих ґрунтів згідно з [8]

Показник	Категорія стабілізованого ґрунту відповідно до значення показника:	
	для незв'язних ґрунтів	для зв'язних ґрунтів
Мінімальний вміст води (виражений як оптимальний вміст води, визначений із застосуванням ущільнення вібраційним молотком)	$W_{0,9}$	Не нормується
Ступінь дезагрегації	Не нормується	P_{60}
Показник несучої здатності після ущільнення*	IP_{40}	IP_{15}
Ступінь зволоженості	Не нормується	$MCV_{8/12}$
Міцність після занурення у воду	10,8	
Об'ємне набухання	Не нормується	$\leq 5 \%$
* У випадку, коли відкриття руху транспорту передбачається не раніше ніж за 7 діб, цей показник дозволяється не встановлювати.		

ектують з кам'яних матеріалів, укріплених гідравлічним в'язучим, механічні характеристики яких переважно забезпечують досягнення мінімально необхідного значення FSM. Застосування стабілізованих ґрунтів під час влаштування основи класу 3 та класу 4 згідно з [12] не передбачене.

Методологія проектування дорожніх одягів з асфальтобетонним покриттям згідно з [10, 11] в окремих випадках передбачає застосування стабілізованих ґрунтів у шарах основи дорожнього одягу (згідно з [10, 11] належить до верхніх шарів дорожнього одягу). Так, для автомобільних доріг з категорією руху KR 1 (сумарна кількість прикладень еквівалентного навантаження (100 кН на вісь) становить $0,03 \cdot 10^6 < N_{100} \leq 0,09 \cdot 10^6$) та KR 2 ($0,09 \cdot 10^6 < N_{100} \leq 0,50 \cdot 10^6$) дозволяється влаштування одношарової основи зі стабілізованих ґрунтів класу міцності при стиску $C_{3/4}$ безпосередньо під асфальтобетонне покриття. Для доріг із більш високим транспортним навантаженням стабілізовані ґрунти застосовують для влаштування додаткової основи або перекриваючого шару, який може також виконувати функцію морозозахисного шару – наприклад, для влаштування морозозахисного шару можуть бути застосовані ґрунти, стабілізовані вапном, класу міцності під час стиском $C_{0,8/1}$ [10].

Згідно з методологією проектування [10] шар суміші, укріпленої гідравлічним в'язучим, зокрема стабілізованих ґрунтів, характеризується різ-

ними послідовними фазами роботи в конструкції. Основною є фаза I до руйнування шару основи внаслідок розтріскування, коли основа працює як монолітна плита, довжина якої багаторазово перевищує товщину; фаза II – шар такої основи розглядається як шар блоків, довжина / ширина яких є співрозмірною до їх товщини, або як шар дисперсних матеріалів [11]. Відповідно до цього положення в альбомі типових конструкцій [10] наведено залежність модулів пружності стабілізованих ґрунтів від класу міцності при стиску та виду в'язучого (табл. 11).

Процес влаштування шару основи дорожнього одягу зі стабілізованих ґрунтів згідно з [10] передбачає застосування матеріалів, виготовлених у змішувальних установках або змішуванням на місці виконання робіт, при цьому в другому випадку товщину шару основи підвищують на 2 см понад значення, встановлене для типової конструкції. При влаштуванні шару додаткової основи або морозозахисного шару зі стабілізованих ґрунтів, виготовлених змішуванням на місці виконання робіт, товщину такого шару не підвищують.

Висновки

Використання стабілізованих ґрунтів відповідно до вимог європейських стандартів передбачає дотримання таких положень.

1. Склад, способи та умови виготовлення зразків ґрунтів, стабілізованих гідравлічним в'язучим відповідно до вимог європейських стандартів

У монографії [14] наведене таке визначення перекриваючого шару (capping layer): «Перекриваючим шаром є шар, який влаштовується між земляним полотном та нижнім шаром основи дорожнього одягу при слабких ґрунтах земляного полотна. Призначенням перекриваючого шару є підвищення несучої здатності земляного полотна та підготовка платформи, на якій буде влаштовано конструкцію дорожнього одягу. Перекриваючий шар влаштовують здебільшого у випадках, коли каліфорнійський показник несучої здатності (CBR, California Bearing Ratio) ґрунтів земляного полотна є нижчим, ніж 5 %, та обов'язково влаштовують при $\text{CBR} < 2,5 \%$ ». Перекриваючий шар влаштовують із неукріплених сумішей або з сумішей, укріплених гідравлічним в'язучим, зокрема зі стабілізованих ґрунтів.

**Залежність модулів пружності стабілізованих ґрунтів від класу міцності при стиску
для шарів основи дорожнього одягу згідно з [10]**

Клас міцності при стиску		Модуль пружності, МПа		
Ґрунти, стабілізовані цементом	Ґрунти, стабілізовані золю-винесенням, шлаком, або дорожнім гідравлічним в'язучим	Фаза I	Фаза II	
			Блоки	Дисперсний матеріал
$C_{3/4}$	$C_{3/4}$	4800	2000	400

забезпечують отримання матеріалів тринадцяти класів міцності при стиску R_c , де стабілізовані ґрунти найбільш високого класу характеризується міцністю при стиску зразків-кубів не менше ніж 12 МПа. Система європейських стандартів встановлює також класифікацію стабілізованих ґрунтів за граничними кривими залежності міцності при розтягненні R_t від модуля пружності E , відповідно до чого стабілізовані ґрунти підрозділяють на п'ять категорій від T1 до T5.

2. Система європейських стандартів передбачає класифікацію свіжовиготовлених сумішей (ґрунту, гідравлічного в'язучого та води) відповідно до категорії несучої здатності безпосередньо після ущільнення. Нормування значень цього показника дає змогу встановлювати можливість відкриття руху транспорту по шару ґрунту, стабілізованого гідравлічним в'язучим, після ущільнення шару; проте, наприклад, для ґрунтів, стабілізованих цементом, на об'єктах, де не передбачене відкриття руху транспорту раніше ніж 7 діб, цей показник дозволяється не нормувати.

3. Виготовлення стабілізованих сумішей змішуванням на дорозі передбачає заходи зі зменшення ризику отримання недостатньо однорідної суміші або неоднорідного за своїми параметрами шару – наприклад, може бути встановлений підвищений вміст в'язучого або забезпечується підвищення товщини шару понад проектне значення.

Література

1. EN 14227-15:2015 Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 15: Hydraulically stabilized soils. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2015. – 24 p.
2. EN 13286-2:2010 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content – Proctor compaction. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2010. – 38 p.
3. EN 13286-3:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 3: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrocompression with controlled parameters. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2003. – 14 p.
4. EN 13286-4:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrating hammer. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2003. – 24 p.
5. EN 13286-5:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 5: Test methods for laboratory reference density and water content

- Vibrating table. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2003. – 18 p.
- 6. EN 13286-48:2005 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 48: Test methods for the determination of degree of pulverization. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2005. – 10 p.
- 7. EN 13286-47:2012 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2012. – 16 p.
- 8. Manual of Contract Documents for Highway Works Series 0800 and Notes for Guidance - Road Pavements - Unbound, Cement and other Hydraulically Bound Mixtures. – Режим доступу: <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/search>
- 9. EN 13286-46:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 46: Test method for the determination of the moisture condition value. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. – Brussels, 2003. – 16 p.
- 10. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do Zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad. – Gdańsk, Katedrze Drogowej Politechniki, 2014. – Режим доступу: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/KTKNPiP.pdf
- 11. Judycki J., Jaskuła P., Pszczola M., Ryś D., Jacewski M., Alenowicz J., Dołycki B., and Stiens M. New Polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavements. MATEC Web of Conferences 122, 04002 (2017). – GAMBIT, 2016. – Режим доступу: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/36/mateconf_gambit2017_04002.pdf
- 12. Design Manual for Roads and Bridges, Volume 7: Pavement Design and Maintenance, Section 2: Pavement Design and Construction, Part 3, HD 26/06 Pavement Design. – 2006. – Режим доступу: <http://gov.uk/guidance/standards-for-highways-online-resources> (дата звернення 08.06.2018 р.)
- 13. Nunn M. Development of a more versatile approach to flexible and flexible composite pavement design. Prepared for Highway Agency, TRL Report TRL615. – 2004. – Режим доступу: <https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL615%281%29.pdf> (дата звернення 09.08.2019 р.)
- 14. Nikolaidis, A. Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality. – CRC, Boca Raton London New York, 2014. – P. 473–479. – Режим доступу: <https://books.google.com.ua/book?ISBN=1466579978>

References

1. EC. (2015). EN 14227-15:2015 Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 15: Hydraulically stabilized soils. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 24.
2. EC. (2010). EN 13286-2:2010 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content – Proctor compaction. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 38.
3. EC. (2003). EN 13286-3:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 3: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrocompression with controlled parameters. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 14.
4. EC. (2003). EN 13286-4:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrating hammer. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 24.

5. EC. (2003). EN 13286-5:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 5: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrating table. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 18.
6. EC. (2005). EN 13286-48:2005 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 48: Test methods for the determination of degree of pulverization. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 10.
7. EC. (2012). EN 13286-47:2012 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 16.
8. EC. (2015). Manual of Contract Documents for Highway Works Series 0800 and Notes for Guidance - Road Pavements - Unbound, Cement and other Hydraulically Bound Mixtures // Published on the site of an European Commission after a number: 2015/100/UK. Retrieved June 08, 2018 from <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/search>
9. EC. (2003). EN 13286-46:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 46: Test method for the determination of the moisture condition value. European Committee for Standardization. Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels, 16.
10. Каталог Типовых Конструкций Навierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do Zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora

- Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r., opracowany w Katedrze Drogowej Politechniki Gdańskiej. Retrieved August 22, 2019 from https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/KTKNPiP.pdf
11. Judycki, J., Jaskuła, P., Pszczoła, M., Ryś, D., Jaczewski, M., Alenowicz, J., Dołycki, B., and Stienss, M. (2016). New Polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavements. MATEC Web of Conferences 122, 04002 (2017) GAMBIT. Retrieved August 30, 2019 from https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/36/mateconf_gambit2017_04002.pdf
 12. Pavement Design. (2006). Design Manual for Roads and Bridges, Volume 7: Pavement Design and Maintenance, Section 2: Pavement Design and Construction, Part 3, HD 26/06. Retrieved June 08, 2018 from <http://gov.uk/guidance/standards-for-highways-online-resources>
 13. Nunn, M. (2004). Development of a more versatile approach to flexible and flexible composite pavement design. Prepared for Highway Agency, TRL Report TRL615/ Retrieved August 09, 2019 from 2004. URL: <https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL615%281%29.pdf>
 14. Nikolaides, A. (2014). Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality. CRC, Boca Raton, London, New York, 473-479. Retrieved May 16, 2018 from <https://booksgoogle.com.ua/book?ISBN=1466579978>

УДК 625.7

© А. С. Литвиненко, інженер шляхів сполучення,
ORCID: 0000-0002-7414-4731

DOI: 10.33868/0365-8392-2020-1-261-48-54

© Anatolii Lytvynenko, railway engineer,
ORCID: 0000-0002-7414-4731

ОБҐРУНТУВАННЯ СУЧАСНОЇ МЕТОДИКИ ЛАБОРАТОРНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ ТА ЇХ РОЗРАХУНКОВОГО СТАНУ В ДОРОЖНІЙ КОНСТРУКЦІЇ (Частина 2)

BACKGROUND OF MODERN TECHNIQUES FOR LABORATORY DETERMINATION OF THE ELASTICITY MODULUS OF COHESIVE SOILS AND THEIR DESIGN CHARACTERISTICS IN THE ROAD STRUCTURE (Part 2)

Анотація. За результатами лабораторних штампових випробувань, зразків ($d=150\text{ мм}$; $H=180\text{ мм}$) насипних з ущільненням ґрунтів, що мають коефіцієнт водонасичення $S_r \geq 0,85$ в інтервалі значень показника текучості $-0,5 \leq I \leq 0,25$, робиться висновок про можливість визначення практично для кожного зразка, їх модулів деформативності (E_{np} ; E_d), розрахункового критичного опору R_o ґрунту і його найбільшої відносної деформації λ_{max} . Навантаження зразків здійснюється ступінчастим навантаженням із пропорційним (в 1,3 рази) збільшення тиску на зразок на кожному ступені. В процесі випробування зразок не розвантажується, а доводиться до умовного руйнування, тобто непропорційного збільшення осадок штамп. Тривалість кожного ступеня навантаження становить три хвилини.

Графіки параболічних функцій типу $\lambda = a\sigma^b$ будують у логарифмічних координатах у вигляді двох відрізків прямих на обидва боки зламу. Показник степені параболі «b» слугує для попередньої оцінки показника деформативності: для модуля пружності $-b \approx 1,0 \pm 0,2$; для модуля деформації $-b \approx 2,0 \pm 0,5$; для модуля текучості $-b \geq 3,0$.

Дається порівняння з аналогічними показниками деформативності інших будівельних і конструктивних матеріалів. Модуль пружності (E_{np}) має тільки ґрунт, який відповідає умовам стандартного ущільнення $\rho_{dmax} > \rho_{dop}$ і $\omega_o < \omega_p$; модуль деформації (E_d) має ґрунт коли $0 < I < 0,5$, а модуль текучості (E_t) має тільки ґрунт $I \geq 0,5$. Природні структуровані ґрунти характеризуються модулем структурної міцності ($E_{ст}$) в інтервалі $0 < I < 0$, який визначається за компресійними випробуваннями.

Із метою зменшення витрати ґрунту і збільшення продуктивності робіт пропонується розглядати задачу визначення показників деформативності ґрунтів для розрахунку дорожніх одязів, як контактну і тому зменшити висоту ґрунтових зразків із 180 мм до 40 мм