

# ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 625.12:624.15-048.32

О. В. ГРОМОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, ел. пошта o.i.hromova@ust.edu.ua, ORCID 000-0002-5149-4165

## Підбір складових та способи модифікації ґрунтоцементу з метою підвищення експлуатаційних властивостей земляного полотна

**Мета.** Основою метою наукової статті є обґрунтований вибір складових компонентів ґрунтоцементних армувальних структурних елементів і методів модифікування структури ґрунтоцементу для підсилення земляного полотна під залізничну колію. **Методика.** Для влаштування ґрунтоцементних підсилювальних елементів під суміщену залізничну колію за бурозмішувальною технологією розв'язано коло задач, що включають: обґрунтований вибір складових компонентів і модифікаторів ґрунтоцементного елемента; визначення властивостей компонентів; встановлення експлуатаційних вимог до ґрунтоцементу і його складу; проектування оптимальних складів із заданими експлуатаційними характеристиками із врахуванням властивостей ґрунтів і режимів роботи. **Результати.** Проведено дослідження впливу складових компонентів ґрунтоцементу на реологічні властивості ґрунтоцементних сумішей та фізико-механічні властивості ґрунтоцементу. На основі обробки даних методом статистичного аналізу обрано оптимальний вміст складових компонентів ґрунтоцементних сумішей, щоб забезпечити технологічні і експлуатаційні показники ґрунтоцементу для різних типів ґрунтів і підсилити ґрунтову основу під час влаштування колії. Досліджено вплив мінеральних зернистих, волокнистих і хімічних модифікаторів на властивості ґрунтоцементу. **Наукова новизна.** З'ясовано можливість використання вертикальних армувальних елементів із ґрунтоцементу з необхідними технологічними та експлуатаційними показниками, отриманих за бурозмішувальною технологією, для підсилення земляного полотна із врахуванням напружено-деформованого стану і морфології ґрунтових основ. Авторка на основі проведеного дослідження здійснила спробу підібрати складові компоненти і розробити оптимальні склади ґрунтоцементу для підсилення ґрунтового полотна залізниці під суміщену колію. Також розглянуто напрями модифікації ґрунтоцементу мінеральними, волокнистими і хімічними добавками. **Практична значимість.** Проведене дослідження дає можливість отримати ґрунтоцементні елементи оптимального складу і властивостей для різних типів ґрунтів і напружено-деформованого стану з метою вертикального підсилення ґрунтових основ під залізничну колію. Для модифікування структури ґрунтоцементу і мінімізації витрати цементу запропоновано застосовувати як модифікувальні компоненти підсилення фіброві волокна. Щоб збільшити щільність, тріщиностійкість, міцність і модуля деформативності і поліпшити пластичність суміші, рекомендовано використати хімічні модифікатори до 0,3 % і для економії цементу – часток тонкодисперсних відходів промисловості у вигляді меленого шлаку чи відсіву каменеподрібнення в кількості 20...30 %.

**Ключові слова:** ґрунтоцемент; ґрунтоцементна паля; бурозмішувальна технологія; модифікатор; ґрунтова основа; земляне полотно; ґрунт; цемент

### Вступ

Зміцнення ґрунтової основи є одним із найскладніших і трудомістких процесів у будівельній галузі, як у промислово-цивільному будівництві, так і в дорожньому і під час реконструкції й підсилення ґрунту під фундаментами споруд,

і під час влаштування підсилення земляного полотна під залізничну колію.

Способам влаштування ґрунтоцементних паль та дослідженням властивостей ґрунтоцементів присвячені роботи багатьох авторів. Зокрема, у роботах [6, 8, 10, 11] досліджено залежності механічних властивостей ґрунтоцементу

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

від морфології ґрунтів, вмісту цементу, ступеня ущільнення ґрунтоцементної суміші, водоцементного відношення суміші, вмісту добавок.

У роботах [4–6] показано ефективність улаштування ґрунтоцементних паль за бурозмішувальною технологією та особливості її використання. Основну увагу приділено шляхам підвищення міцності ґрунтоцементу.

У роботі [9, 12] виконано оцінку впливу пластифікувальних добавок на міцність ґрунтоцементу.

Установлено [10], що щільність ґрунтоцементу залежить від насиченості ґрунту водою, залишкова кількість якої після гідратації цементу формує пористу структуру матеріалу, яка, у свою чергу, є провідною у формуванні механічних властивостей ґрунтоцементу.

Ефективне використання зв'язувальних властивостей цементу в разі зміцнення ґрунту залежить від ступеня зволоження ґрунтоцементної суміші з подальшим її ущільненням. У випадку недостатнього зволоження суміші неможливо досягти потрібної міцності ґрунтоцементу, навіть за умови надлишкової кількості цементу, задовільних властивостей ґрунту чи достатнього ущільнення [3].

Фізико-хімічні властивості лесових і лесованих суглинків, а саме вміст глинистих частинок, лужна реакція середовища, незначна кількість легкорозчинних солей, легке диспергування під час зволоження за рахунок водорозчинних зв'язків між частинками сприяють їх використанню для виготовлення ґрунтоцементу [2, 3].

Механічні властивості ґрунтоцементу забезпечуються більшою мірою утворенням кристалізаційних зв'язків, що виникають як новоутворення в процесі тверднення ґрунтоцементної суміші. На величину модуля деформації ґрунтоцементу значно впливає його щільність. Експериментально доведено, що за однакової призмової міцності модуль деформації більший для зразків із більшою щільністю [2].

Підвищення механічних характеристик ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу уповільнюється після досягнення величини у 20 %, тобто цей вміст слід вважати оптимальним у разі використання ґрунтоцементу для армування ґрунту [2].

Характеристикою впливу морфології ґрунту взято число пластичності  $I_p$ , що характеризує вміст глинистих частинок у ґрунті [2].

Механічні та експлуатаційні характеристики ґрунтоцементу можна поліпшити введенням добавок-модифікаторів. Поліпшує механічні характеристики ґрунтоцементу наявність зернистих модифікаторів-піщаних і гравійних частинок. Витрати цементу можна зменшити, при цьому перемішування й ущільнення суміші полегшується. Це вказує на доцільність використання гранулометричних модифікаторів (пісків, хвостів, шлаку, золи тощо) у ґрунтах для їх закріплення. Під час введення домішок піску та хвостів у кількості до 20 %, зростання міцності та модуля деформації складає 20...40 % [2]. Зокрема, вплив золи-виношення на властивості ґрунтоцементу досліджено в роботах [1, 7].

Також для отримання заданих реологічних властивостей ґрунтоцементної суміші застосовують хімічні добавки-модифікатори [2, 9, 12]. Зокрема, у ВСН 40–88 [2] наведено перелік модифікаторів, які рекомендовано вводити в склад ґрунтоцементу залежно від параметрів ґрунтів. Загалом усі добавки вводять із метою зменшення витрати цементу та поліпшення технологічних властивостей суміші.

Важливим параметром суміші для отримання ґрунтоцементу є водоцементне відношення, яке за різними оцінками може змінюватись від 0,6 до 1 [2].

За даними [7], процес твердіння ґрунтоцементу, на відміну від твердіння бетону, має більш тривалий характер. Швидкість твердіння істотно залежить від численних факторів – температури середовища, хімічного складу ґрунтової води, а також від типу ґрунту, що бере участь у формуванні ґрунтоцементу. У піщаних ґрунтах набір міцності відбувається найшвидше. На думку різних авторів, ґрунтоцемент на основі піску набирає приблизно 50 % від повної міцності через 5...7 днів, а в тридцятиденний термін – практично повну міцність.

Більш тривалим є процес набору міцності ґрунтоцементу, сформованого в глинистих ґрунтах, що завжди вимагає проведення додаткових досліджень, на основі результатів яких може бути визначено період навантаження паль.

Вплив уведення фібрових матеріалів розглянуто в роботах [2, 14].

Не викликає сумнівів, що вибір складових і розробка ефективного матеріалу й методу під-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

силення земляного полотна є складною багато-параметричною задачею під час влаштування залізничної колії. Згідно з вітчизняним і закордонним досвідом, описаним у розглянутих вище роботах, вибір складових і методів модифікування під час влаштування елементів підсилення земляного полотна можна обґрунтувати, для чого провести аналіз за позитивними та негативними параметрами, які характеризують конкретні експлуатаційні умови розміщення в ґрунтовій основі елементів підсилення. Це викликає необхідність дослідити й обґрунтовано вибрати складові компоненти і спосіб модифікації ґрунтоцементного елемента для підсилення за найбільш оптимальних параметрів технології його влаштування.

### Мета

Основною метою наукової статті є обґрунтований вибір складових компонентів ґрунтоцементних армувальних структурних елементів і методів модифікування структури ґрунтоцементу для підсилення земляного полотна під залізничну колію за бурозмішувальною технологією.

### Методика

Комплекс виконання містить визначення ефективних параметрів підсилення земляного полотна на основі інноваційної бурозмішувальної технології шляхом обґрунтованого вибору складових компонентів ґрунтоцементу, проєктування оптимальних складів із врахуванням властивостей ґрунтів для влаштування армувального елемента під суміщену залізничну колію.

Важливою задачею отримання високоексплуатаційних показників ґрунтової основи є досконалий вибір складових компонентів ґрунтоцементу для розробки оптимальних рецептур спеціальних ґрунтоцементних розчинів, що дозволяють досягати підвищення несної здатності та зменшення інтенсивності й рівня деформування ґрунтів під суміщену залізничну колію з інтенсивним високошвидкісним рухом залізничного транспорту.

Для створення ґрунтоцементних структур із заданими фізико-механічними властивостями необхідно застосувати комплекси модифікаторів, що поліпшують технологічність суміші, збільшують її рухливість і зв'язність, знижують в'язкість і поліпшують здатність до нагнітання,

при цьому з'являється можливість регулювати строки тужавіння суміші і швидкість набору міцності ґрунтоцементної системи, забезпечувати фізико-хімічну сумісність компонентів для досягнення заданих якостей, а також можливість підвищити або забезпечити комплекс необхідних спеціальних експлуатаційних властивостей, таких як електроізоляційні, антикорозійні, водонепроникні характеристики ґрунтоцементних структур.

Під час постановки задач і способів їх розв'язання необхідно сформулювати комплекс вимог до ґрунтоцементу для його ефективного застосування в разі підсилення земляного полотна під суміщену залізничну колію. На основі встановлених вимог виконують підбір складових і розробку рецептур ґрунтоцементних розчинів, що дозволяють максимально ефективно реалізувати технологію підсилення земляного полотна залізниць.

До ґрунтоцементу як армувального елемента в структурі ґрунту ставлять такі експлуатаційні вимоги:

- достатня механічна міцність;
- модуль деформації ґрунту;
- підвищена щільність скелета ґрунту;
- водостійкість.

У забезпеченні комплексу механічних і експлуатаційних вимог важливу роль відіграє склад ґрунтоцементу. На основі проведеного попереднього обґрунтування [13] взято такі його показники:

- вміст цементу (відсоток вмісту цементу від маси скелета ґрунту в суміші);
- водонасичення ґрунтоцементної суміші;
- вміст модифікувальних добавок (наповнювачів, добавок, заповнювачів тощо).

Із метою направленої модифікування структури ґрунтоцементу, поліпшення технологічних і експлуатаційних властивостей у дослідженні взято такі контрольовані складові:

- вміст мінерального модифікатора (меленого доменного шлаку);
- вміст хімічного модифікатора (суперпластифікатора СП–1 (С–3));
- вміст крупнодисперсної домішки (відсіву каменедроблення або піску).

Як базовий компонент для розробки складів ґрунтоцементу було обрано декілька типів ґрунтів, які потребують стабілізації і підсилення.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Найбільш технологічними для виготовлення ґрунтоцементу бурозмішувальним методом є лесові і лесовані ґрунти. Для отримання достовірних даних рекомендовано перед влаштуванням ґрунтоцементних елементів провести попередньо заміси на ґрунтах, на яких передбачено влаштовувати ґрунтоцементні палі. До ґрунтів, що не потребують модифікування гранулометричними добавками, належать великоуламкові ґрунти оптимального або близького до оптимального зернового складу; неоднорідні піски (крупні, середньої крупності), супіски з числом пластичності понад 3 (переважно супіски піщаністі, супіски пилуваті), а також легкі суглинки.

Для проведення досліджень на будівельних майданчиках були відібрані зразки ґрунтів, які потребують підсилення на різних ділянках земляного полотна. Основними параметрами властивостей ґрунтів, що визначають несну здатність основ і їх деформації, є такі [3]:

міцності – кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , питоме зчеплення  $c$ , межа міцності на одновісний стиск скельного ґрунту  $R_c$ ;

– деформативності – модуль деформації  $E$ , модуль пружності  $E_p$ , коефіцієнт поперечної деформації  $\nu$ ;

– фізичні – щільність  $\rho$ , питома вага  $\gamma$ , вологість  $W$ , показник плинності  $IL$ , крупність фракцій, однорідність складу.

За результатами інженерно-геологічних вишукувань на відповідних майданчиках для подальших експериментальних досліджень були обрані такі ґрунти:

– ґрунт № 1: суглинок тугопластичний просідний, число пластичності  $I_p = 12\%$ ;

– ґрунт № 2: суглинок м'якопластичний, число пластичності  $I_p = 9\%$ ;

– ґрунт № 3: супісок пластичний просідний, число пластичності  $I_p = 6\%$ .

Як зв'язувальну речовину для виготовлення ґрунтоцементних зразків і їх подальшого дослідження було обрано цемент із гідравлічно-пуццолановими властивостями ПЦ Ш/Б–Ш–400 Криворізького цементного заводу, який характеризується помірною динамікою набору ранньої міцності та високою міцністю в більш пізні терміни твердіння та технологічністю у застосуванні. Цемент за фізико-механічними властивостями відповідає вимогам ДСТУ Б В. 2.7–46–96 марки ПЦШ/Б–Ш–400 з вмістом добавки доменного гранульованого шлаку 25...35% і чистого клінкера 65...75%.

Як часткову заміну цементу з метою його економії використовують різноманітні мінеральні добавки і наповнювачі, що модифікують і сприяють підвищенню щільності скелета ґрунтоцементу, а також водостійкості під час твердіння у вологих умовах. Для оптимізації гранулометричного складу ґрунтової суміші застосовують гранулометричні добавки дисперсних матеріалів, що відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7–30, ДСТУ Б В.2.7–35, ДСТУ Б В.2.7–149. За проведеними попередніми дослідженнями, вміст добавок дисперсних матеріалів становить від 15 до 30% від маси ґрунту, оптимальну кількість визначають під час підбору складу суміші в лабораторії.

Як мінеральний модифікатор у дослідженні використано мелений доменний гранульований шлак ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». У табл. 1 наведено фізико-механічні властивості доменного гранульованого шлаку, застосованого в дослідженні.

Таблиця 1

**Фізико-механічні властивості меленого гранульованого доменного шлаку  
ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»**

Table 1

**Physical and mechanical properties of ground granulated blast furnace slag at PJSC  
«Dneprovsky Integrated Iron & Steel Works»**

Активність $f_{28}$ , МПа	Модуль пружності, $E_{пруж}$ , МПа	Модуль основності, $M_0$	Модуль активності, $M_a$	Коефіцієнт якості, $K_y$	Насипна густина, $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Істинна густина, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Питома поверхня, $S_{пит}$ , см <sup>2</sup> /г
6,5	400	1,24	0,25	1,68	1 145	1,97	2 800

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Як дрібнозернистий модифікатор у дослідженні використано дніпровський річковий кварцовий пісок середньої крупності  $M_k = 3,2$ , вологістю 7 %, середньою густиною  $2,62 \text{ г/см}^3$ , та гранітний відсів від каменеподрібнення. Під час введення домішок піску та відсіву від каменеподрібнення у кількості до 10...30 % відбувається

зростання міцності за стискання зразків та модуля деформації до 30 %.

Характеристику зернового складу та фізичних властивостей піску та відсіву наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

## Гранулометричний склад дніпровського річкового кварцового піску

Table 2

## Particle size distribution of Dnipro river quartz sand

Залишки на ситах	Розмір сит, мм						Менше ніж 0,16 мм
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
частинні, г	0	9,0	554	254	76	26	81,0
частинні, %	0	0,9	55,4	25,4	7,6	2,6	8,1
Повні, %	0	0,9	56,3	81,7	89,3	91,9	100

Таблиця 3

## Гранулометричний склад і фізичні властивості відсіву Рибальського кар'єру

Table 3

## Particle size distribution and physical properties of Rybalsky open pit screenings

$\rho_s, \text{ г/см}^3$	Гранулометричний склад, %	Значення характеристик відсіву	$M_k$	$W, \%$
2,7	> 2 мм	0,70	1,5	5
	2...0,5 мм	3,42		
	0,5...0,25 мм	19,18		
	0,25...0,1 мм	67,90		
	<0,1 мм	8,80		

Для зниження водопотреби ґрунтоцементної суміші та збереження рухливості як пластифікатору вальну добавку застосовано суперпластифікатор СПІ (С–3) [12], що являє собою сульфовані продукти конденсації формальдегіду. Для досліджень взято значення вмісту добавки пластифікатора С–3 у відсотках від маси цементу 0, 0,3 і 0,5 %.

Оскільки на різних будівельних майданчиках можуть бути різні ґрунтові основи, для визначення оптимального вмісту складових перед проектуванням необхідно проводити експери-

ментальні дослідження на дослідних майданчиках із відпрацювання технологічних параметрів укріплення ґрунтів і визначення оптимальних значень міцності в разі стиску  $f_n$  та модуля деформацій  $E$  в конкретних експлуатаційних умовах.

## Результати

У ґрунтоцементній суміші основним компонентом, що зміцнює структуру і впливає на механічні властивості ґрунтоцементних елементів, є цемент. Тому в дослідженні ставимо задачу дослідити залежність міцності в разі стиску та модуля деформації від вмісту цементу, отримати

залежності ( $f_n$ ,  $E=f(\Pi)$ ) і за графіками визначити оптимальний вміст цементу.

Згідно з отриманими попередніми даними для різних типів ґрунтів за досліджувану кількість цементу для досягнення оптимальної міцності ґрунтоцементу взято 10, 20 і 30 % [13].

Таблиця 4

**Середні значення механічних характеристик ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу**

Table 4

**Average values of mechanical characteristics of soil cement depending on the cement content**

Вміст цементу $\Pi$ , %	В/Ц	Щільність скелета $\rho_d$ , т/м <sup>3</sup>	Середні значення механічних характеристик	
			Міцність $f_n$ , МПа	Модуль деформації $E$ , МПа
5	0,8	1,35	0,5	60
<b>10</b>		1,36	<b>1,3</b>	<b>170</b>
15		1,365	2,1	260
<b>20</b>		1,37	<b>2,7</b>	<b>360</b>
25		1,38	3,2	410
<b>30</b>		1,39	<b>3,7</b>	<b>440</b>
35		1,39	3,9	450

Для модифікації технологічних властивостей ґрунтоцементної суміші під час влаштування армувальних елементів уведено добавку суперпластифікатора С–3 в кількості від 0,3 до 0,5 %. Таку кількість добавки взято за результатами попередніх досліджень для встановлення оптимальної технологічної ефективності.

Результати визначення легкоукладальності ґрунтоцементних розчинів залежно від вмісту цементу та суперпластифікатора наведено в табл. 5.

Згідно з незначним приростом пластичності та значним впливом на міцність, для подальших досліджень взято вміст суперпластифікатора 0,3 % від маси цементу. Для оцінки впливу вмісту домішок на характеристики ґрунтоцементного розчину взято значення вмісту цементу 30 % для ґрунту 1 та 20 % для ґрунтів 2 і 3.

Таблиця 5

**Реологічні характеристики ґрунтоцементної суміші залежно від вмісту цементу та пластифікуючого модифікатора**

Table 5

**Rheological characteristics of soil-cement mixture depending on cement content and plasticizing modifier**

Вид ґрунту	В/Ц, %	Вміст цементу, %	Вміст С–3, %	Легкоукладальність, см			
Ґрунт 1	0,8	10	0	7			
			0,3	10			
			0,5	14			
		20	0	8			
			0,3	12			
			0,5	15			
			30	0	8		
				0,3	14		
				0,5	17		
Ґрунт 2	0,8	10	0	6			
			0,3	8			
			0,5	14			
		20	0	8			
			0,3	12			
			0,5	15			
		30	0	9			
			0,3	12			
			0,5	16			
			Ґрунт 3	0,8	10	0	4
						0,3	6
						0,5	10
20	0	5					
	0,3	10					
	0,5	14					
30	0	7					
	0,3	12					
	0,5	16					

Середнені результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту цементу та модифікувальної добавки наведено на рис. 1.

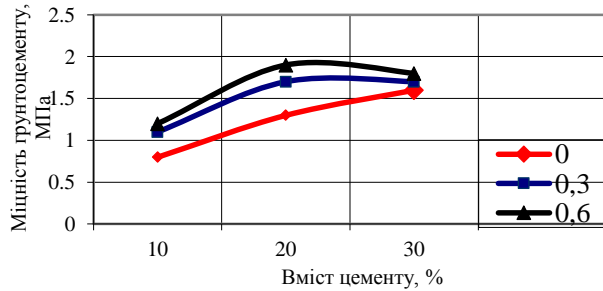


Рис. 1. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту цементу та модифікатора

Fig. 1. Dependence of soil cement strength on cement and modifier content

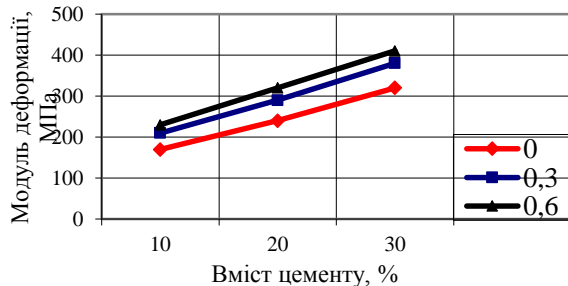


Рис. 2. Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від вмісту цементу і добавки

Fig. 2. Dependence of the modulus of deformation of soil-cement on the content of cement and additives

Аналіз графіків залежності механічних характеристик від вмісту цементу показує, що зі збільшенням вмісту цементу як призмова міцність, так і модуль деформації зростають практично пропорційно до 25 % вмісту, за подальшого збільшення вмісту цементу приріст зростання характеристик уповільнюється. Звідси можна зробити висновок, що ефективними межами вмісту цементу для підсилення основ армуванням ґрунтів є 15...25 % від ваги ґрунту в суміші.

Результати визначення легкоукладальності ґрунтоцементної суміші залежно від вмісту шлаку наведено в табл. 6.

Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку наведено в табл. 7 та на рис. 3.

Таблиця 6

**Реологічні властивості ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку**

Table 6

**Rheological properties of soil cement depending on slag content**

Вид ґрунту	В/Ц	Вміст цементу, %	Вміст шлаку, %	Легкоукладальність, см
Ґрунт 1	0,8	30	0	14
			20	12
			40	9
Ґрунт 2	0,8	20	0	12
			20	8
			40	6
Ґрунт 3	0,8	20	0	10
			20	6
			40	3

Таблиця 7

**Механічні характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту шлаку**

Table 7

**Mechanical characteristics of soil cement depending on slag content**

Вид ґрунту	$I_p$ , %	Вміст цементу, %	Вміст шлаку, %	Значення характеристики		
				$f_n$ , МПа		$E$ , МПа
				7 діб	28 діб	
Ґрунт 1	12	30	0	1,5	1,8	380
			20	1,7	2,9	440
			40	1,9	3,2	460
Ґрунт 2	9	20	0	1,2	2,8	380
			20	1,4	3,6	460
			40	1,5	4,0	450
Ґрунт 3	6	20	0	1,5	3,8	400
			20	1,6	4,2	440
			40	1,8	4,3	460

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Згідно з незначним впливом вмісту шлаку 40 % на приріст міцності та значним зниженням пластичності суміші, взято вміст шлаку 20 % від маси цементу для ґрунтів 1 і 2, та вміст шлаку 0 % для ґрунту 3.

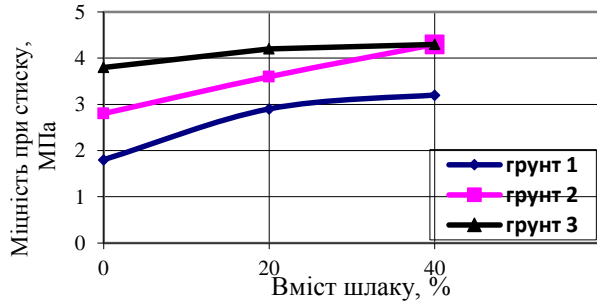


Рис. 3. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту шлаку

Fig. 3. Dependence of soil cement strength on slag content

Результати визначення міцності та модуля деформації зразків ґрунтоцементу для різних типів укріплювальних ґрунтів залежно від вмісту відсіву наведено в табл. 8 та на рис. 4.

Таблиця 8

#### Характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту відсіву

Table 8

#### Characteristics of soil cement depending on the content of screenings

Вид ґрунту	$I_p$ , %	Вміст цементу, %	Вміст відсіву, %	Значення характеристики		
				$f_n$ , МПа		$E$ , МПа
				7 діб	28 діб	
ґрунт 1	12	30	0	1,7	2,9	440
			20	1,8	3,5	480
			40	2,0	3,8	510
ґрунт 2	9	20	0	1,4	3,6	460
			20	1,8	4,2	460
			40	2,1	4,4	480
ґрунт 3	6	20	0	1,5	3,8	400
			20	1,9	3,9	440
			40	2,2	4,2	490

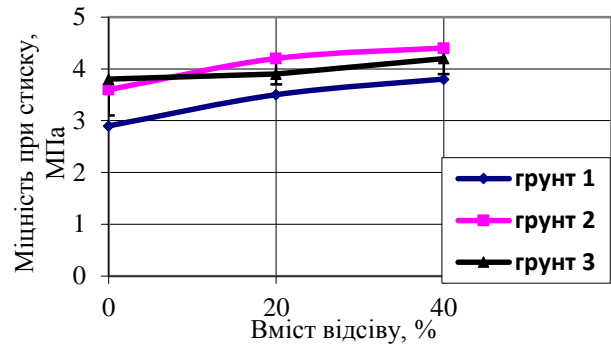


Рис. 4. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту відсіву

Fig. 4. Dependence of soil cement strength on the screening content

Відповідно до незначного впливу вмісту відсіву шлаку 40 % на приріст міцності та значного зниження пластичності суміші, взято вміст відсіву 20 % для ґрунту 1. Для ґрунтів 2 та 3 відсів не застосовують через значне зниження пластичності суміші.

Результати визначення легкоукладальності ґрунтоцементної суміші залежно від вмісту відсіву наведено в табл. 9.

Таблиця 9

#### Реологічні характеристики ґрунтоцементу залежно від вмісту відсіву

Table 9

#### Rheological characteristics of soil cement depending on the content of screenings

Вид ґрунту	В/Ц	Вміст цементу, %	Вміст відсіву, %		Легкоукладальність, см
			відсів	ґрунт	
ґрунт 1	0,8	30	0	100	12
			20	80	10
			40	60	6
ґрунт 2	0,8	20	0	100	8
			20	80	4
			40	60	1
ґрунт 3	0,8	20	0	100	10
			20	80	4
			40	60	1



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту піску наведені на рис. 5.

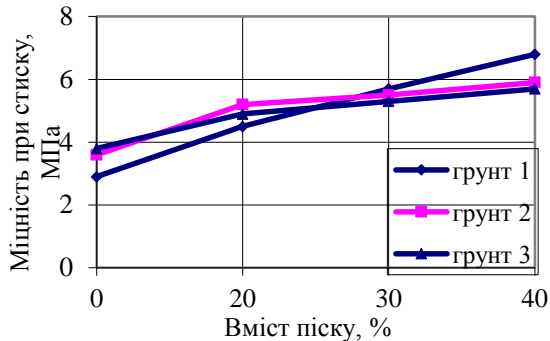


Рис. 5. Залежності міцності ґрунтоцементу від вмісту піску

Fig. 5. Dependence of soil cement strength on the sand content

За отриманими результатами для розглянутих типів ґрунтів можуть бути рекомендовані такі співвідношення складових компонентів:

– ґрунт № 1: суглинок  $I_p = 12\%$ ; цемент 30%; суперпластифікатор С–3 0,3%; мелений доменний шлак 20%; відсів каменеподрібнення 20%.

– ґрунт № 2: суглинок  $I_p = 9\%$ ; цемент 20%; суперпластифікатор С–3 0,3%; мелений доменний шлак 20%;

– ґрунт № 3: супісок  $I_p = 6\%$ , цемент 20%; суперпластифікатор С–3 0,3%; відсів каменеподрібнення – 20...30%.

Для уточнення отриманих результатів та рекомендованих рецептур складів необхідно отримати значення властивостей ґрунтоцементів у більш пізньому віці твердіння і на реальних ґрунтах влаштування ґрунтоцементних паль.

Ще одним зі способів модифікації структури ґрунтоцементу з метою підвищення тріщиностійкості, в'язкості руйнування, зносостійкості, зниження усадки й повзучості є армування ґрунтоцементу фіброю. Армований фіброю ґрунтоцемент є різновидом дисперсно-армованого бетону, його виготовляють із ґрунтоцементного або піщано-цементного розчину, в якому як армувальний компонент рекомендовано використовувати сталеву, полімерну або базальтову фібру, що рівномірно розподіляється по об'єму суміші. Спільність роботи ґрунтоцементної матриці і волокна (фібр) забезпечується за рахунок зчеплення по їх поверхні й анкерування фібри за рахунок періодичного профілю та її кривизни

в поздовжньому і поперечному напрямку [2, 14]. Застосування ґрунтофібробетону як підсилювального елемента дозволяє або зовсім відмовитися від арматурного каркасу, або обмежитися його використанням у верхній частині палі для зв'язку з елементами ростверку. Дослідні зразки із застосуванням волокон базальтової і поліпропіленової фібри та характер руйнування зразків наведено на рис. 6.

У дослідженні фізико-механічні властивості зразків ґрунтоцементного фібробетону, виготовлених із застосуванням добавки С–3 у кількості 0,3 і 5% базальтової і поліпропіленової фібри відповідно від маси цементу, показали збільшення міцності до 6...8 МПа. Із додаванням фібри спостерігалось в'язке руйнування і зменшення тріщиноутворення ґрунтоцементу, що дає можливість рекомендувати використовувати волокна для армування паль.

*a – a*



*б – б*



*в – в*



Рис. 6. Підсилення ґрунтоцементу фіброю: *a* – зразки із базальтовою і поліпропіленовою фіброю; *б* – пластичне руйнування зразків із додаванням фібри; *в* – структура фіброґрунтоцементу

Fig. 6. Fiber reinforcement of soil cement: *a* – samples with basalt and polypropylene fiber; *b* – plastic fracture of samples with fiber addition; *c* – structure of fiber soil cement

До експлуатаційних властивостей ґрунтоцементу належить водостійкість. Оскільки ґрунтоцемент розглянуто також як зміцнений ґрунт, то

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

для оцінювання його водостійкості потрібно визначати коефіцієнт розм'якливості у воді. За коефіцієнтом розм'якливості ґрунти поділяють на нерозм'якшувальні ( $K_p \geq 0,75$ ) та розм'якшувальні ( $K_p \leq 0,75$ ).

Із метою дослідження водостійкості ґрунтоцементу було виготовлено дослідну партію зразків такого складу: кількість цементу – 20 % від ваги сухого ґрунту, водоцементне відношення розчину –  $V/C = 0,8$ . Ґрунт використано лесовий. Виготовлено 6 зразків-кубів розміром  $7,07 \times 7,07 \times 7,07$  см. Зразки було поділено на дві серії по 6 штук. Зразки першої серії зберігали протягом 28 діб у воді, зразки другої серії зберігали протягом 28 діб у повітряно-сухих умовах. Через 28 діб зразки випробовували на міцність під час стискання. Результати випробувань наведено в табл. 10.

Таблиця 10

Визначення водостійкості зразків ґрунтоцементу

Table 10

**Determination of water resistance  
of soil cement samples**

№	$f_{cm}^{сух}$ , МПа	$f_{cm}^w$ , МПа	$K_p$	Висновок про водостійкість
1	4,1	4,3	1,0	>0,75 водостійкий
2	3,85	3,5	0,91	>0,75 водостійкий
3	3,6	3,1	0,86	>0,75 водостійкий
4	4,25	3,85	0,91	>0,75 водостійкий
5	3,75	3,4	0,91	>0,75 водостійкий
6	3,56	4,0	1,12	>0,75 водостійкий
	3,85	3,7	0,95	>0,75 водостійкий

За результатами випробувань (табл. 10) для кожного зразка визначено границю міцності в разі стискання у водонасиченому стані та повітряно-сухому. Також для отриманих значень міцності ґрунтоцементу проведено статистичну обробку даних методом найменших квадратів. Коефіцієнт варіації для зразків, що зберігалися у повітряно-сухих умовах, склав  $C_v = 0,05$ ; для зразків, що зберігалися у воді, –  $C_v = 0,09$ . Отримані дані свідчать про однорідність ґрунтоцементу як матеріалу та високу точність проведення експерименту, що підтверджують дані випробувань [5].

За даними табл. 10 коефіцієнт розм'якливості, який визначають як відношення середніх значень границь міцності на стиск у водонасиченому та повітряно-сухому стані, для зразків ґрунтоцементу, виготовленого шляхом перемішування суглинку з кількістю цементу 20 % від ваги сухого ґрунту, становить 0,95, тому ґрунтоцементний елемент можна віднести до водостійкого.

### Наукова новизна та практична значимість

У роботі встановлено можливість використання вертикальних армувальних елементів із ґрунтоцементу з необхідними технологічними та експлуатаційними показниками, отриманих за бурозмішувальною технологією, для підсилення земляного полотна із врахуванням напружено-деформованого стану і морфології ґрунтових основ. Авторка на базі проведеного дослідження здійснила спробу підібрати складові компоненти і розробити оптимальні склади ґрунтоцементу для підсилення ґрунтового полотна під залізничну колію. Також розглянуто напрями модифікації ґрунтоцементну мінеральними і хімічними добавками.

Отримані результати можливість отримати ґрунтоцементні елементи оптимального складу і властивостей для вертикального підсилення ґрунтових основ під залізничну колію.

### Висновки

У ході експериментальних досліджень:

1. Виконано вибір складових компонентів і отримано ґрунтоцементний елемент для підсилення ґрунтових основ із фізико-механічними характеристиками, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

2. Одним із ефективних напрямів отримання вертикальних армувальних елементів і зниження вартості під час підсилення й укріплення земляного полотна є використання як матеріалу суміші ґрунту з додаванням цементу в кількості 20..30 % за водоцементного відношення 0,8 в разі застосування бурозмішувальної технології.

3. Встановлено вимоги до складових компонентів ґрунтоцементних елементів за різних умов роботи.

4. Для модифікування структури ґрунтоцементу й мінімізації витрати цементу, запропоновано застосовувати як модифікувальні компоненти підсилення фіброві волокна. Для збільшення щільності, тріщиностійкості, міцності і модуля деформативності, поліпшення пластичності суміші рекомендовано використання хімічних модифікаторів до 0,3 % і для економії цементу – часток тонкодисперсних відходів промисловості у вигляді меленого шлаку чи відсіву каменеподрібнення в кількості 20...30 %.

5. Встановлено оптимальне співвідношення цементу з ґрунтом, вмісту модифікувальних компонентів складу ґрунтоцементного розчину

залежно від властивостей і складу ґрунту із врахуванням його напружено-деформованого стану.

### Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проведено за підтримки гранту Національного фонду досліджень України під час реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блашук Н. В., Маєвська І. В., Гончарук М. С. Використання золи винесення у складі ґрунтоцементу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. Т. 29, № 2. С. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65>
2. ВСН-40-88. *Проектування і влаштування фундаментів із цементогрунту для малоповерхових сільських будинків*. Київ, 1989. 13 с.
3. Слісєєва М. О., Бабенко М. М., Савицький М. В., Стоун К., Піпа В. В. Глинисті ґрунти Придніпровського регіону для ґрунтобетону. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 99. С. 71–77.
4. Зоценко М. Л. Ґрунтоцементні палі, що виготовляються бурозмішувальним методом. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2013. Вип. 3 (38), Т. 2. С. 110–122.
5. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. *Бурові палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом*: монографія. Харків : «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с.
6. Зоценко Н. Л., Петраш Р. В., Петраш О. В. Контроль за якістю ґрунтоцементних елементів, які виготовлені за бурозмішувальною технологією. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2010. Вып. 56. С. 188–193.
7. Крисан В. І. *Дослідження напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, армованого ґрунтоцементними елементами, що виготовлені по струминно-змішувальній методиці* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Полтава : ПолтНТУ, 2010. 24 с.
8. Ларцева І. І. *Закріплення зсувонебезпечних територій за допомогою цементациї за бурозмішувальною технологією* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Полтава : ПолтНТУ, 2010. 21 с.
9. Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (34), Т. 2. С. 171–177.
10. Петраш Р. В. *Спільна робота ґрунту та елементів армування, які виготовлені за бурозмішувальною технологією* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Полтава : ПолтНТУ, 2009. 20 с.
11. Петруняк М. В. Методика виготовлення та дослідження ґрунтоцементу в лабораторних умовах. *Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34), Т. 2. С. 184–189.
12. Троян В. В. *Добавки для бетонів і будівельних розчинів*. ТОВ «Видавництво» «Аспект-Поліграф», 2010. 228 с.
13. Тютюкін О. Л., Громова О. В. Обґрунтування вибору складових компонентів і методу отримання ґрунтоцементного елемента для підсилення земляного полотна. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 24. С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2023/292006>
14. Fan J., Wang D., Qian D. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10. Iss. 4. P. 791–797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004>

O. V. HROMOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Architectural Design, Landscaping and Building Materials», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 304 73 33, e-mail o.v.hromova@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

## Selection of Components and Methods of Modification of Soil Cement to Improve the Performance Properties of Subgrade

**Purpose.** The main objective of the scientific article is a reasonable selection of soil-cement reinforcing structural elements and methods of modifying the soil-cement structure to strengthen the subgrade for railroad tracks. **Methodology.** For the construction of soil-cement reinforcing elements for a combined railway track using drilling and mixing technology, a number of tasks were solved, including: a reasonable selection of the components and modifiers of the soil-cement element; determination of the properties of the components; establishment of operational requirements for soil-cement and its composition; design of optimal compositions with specified performance characteristics, taking into account the properties of soils and operating modes. **Findings.** The influence of soil-cement components on the rheological properties of soil-cement mixtures and the physical and mechanical properties of soil-cement was studied. Based on the data processing by statistical analysis, the optimal content of the constituent components of soil-cement mixtures was selected to ensure the technological and operational performance of soil-cement for different types of soils and to strengthen the soil base during track construction. The influence of mineral granular, fibrous and chemical modifiers on the properties of soil cement was investigated. **Originality.** The possibility of using vertical reinforcing elements made of soil cement with the necessary technological and operational parameters obtained by drilling and mixing technology to strengthen the subgrade, taking into account the stress-strain state and morphology of the soil bases, has been determined. Based on the study, the author made an attempt to select the components and develop optimal soil cement compositions for strengthening the subgrade of a railroad for a combined track. The directions of modification of soil cement with mineral, fiber and chemical additives are also considered. **Practical value.** The study makes it possible to obtain soil-cement elements of optimal composition and properties for different types of soils and stress-strain states in order to vertically strengthen the soil bases for the railway track. To modify the structure of soil cement and minimize cement consumption, it is proposed to use fiber fibers as modifying reinforcement components. To increase the density, crack resistance, strength, and modulus of deformability and improve the plasticity of the mixture, it is recommended to use chemical modifiers up to 0.3 % and to save cement – particles of fine industrial waste in the form of ground slag or stone grinding screenings in the amount of 20...30 %.

**Keywords:** soil cement; soil-cement pile; drilling and mixing technology; modifier; soil base; subgrade; soil; cement

### REFERENCES

- Blaschuk, N., Maevska, I., & Goncharuk, M. (2021). Use of assembly ash in the composition of soil cement. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 29(2), 51-65. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65> (in Ukrainian)
- Proektivannia i vlashtuvannia fundamentiv iz tsementohruntu dlia malopoverkhovykh silskykh budynkiv VSN-40-88.* (1989). Kyiv. (in Ukrainian)
- Yelisiieva, M. O., Babenko, M. M., Savytskyi, M. V., Stone, C., & Pipa, V. V. (2017). Clay soils of the prydniprovsk region for earthconcrete. *Stroytelstvo, materiyalovedenye, mashynostroenye*, 99, 71-77. (in Ukrainian)
- Zocenko, M. L. (2013). Soil-cement piles, manufactured by boring-mixing method. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 3((38)2), 110-122. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Vinnikov, Y. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi pali, yaki vyhotovliautsia za burozmishuvalnym metodom: monohrafiia.* Kharkiv : «Drukarnia Madryd». (in Ukrainian)
- Zotsenko, N. L., Petrash, R. V., & Petrash, O. V. (2010). Kontrol' za yakistyu hruntotsementnykh elementiv, yaki vyhotovleni za burozmishuval'noyu tekhnolohiye. *Construction, Materials Science, Mechanical Engineering*, 56, 188-193. (in Ukrainian)
- Krysan, V. I. (2010). *Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu gruntovoho masyvu, armovanoho gruntotse-mentnymi elementamy, shcho vyhotovleni po strumynno-zmishuvalnii metodytsi* (Extended abstract of PhD dissertation). Poltava: PolNTU. (in Ukrainian)

8. Lartseva, I. I. (2010). *Zakriplennia zsuvo nebezpechnykh terytorii za dopomohoiu tsementatsii za burozmishuvalnoi u tekhnolohii eu* (Extended abstract of PhD dissertation). Poltava: PoltNTU. (in Ukrainian)
9. Novitskiy, O. P. (2012). Influence of plasticizing additions for strength of soil-cement. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 4((34)2), 171-177. (in Ukrainian)
10. Petrash, R. V. (2009). *Spilna robota gruntu ta elementiv armuvannia, yaki vyhotovleni za burozmishuvalnoi u tekhnolohii eu* (Extended abstract of PhD dissertation). Poltava: PoltNTU. (in Ukrainian)
11. Petrunyak, M. V. (2012). Method of preparation and study of soil-cement under laboratory conditions. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 4((34)2), 184-189. (in Ukrainian)
12. Troian, V. V. (2010). *Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv*. TOV «Vydavnytstvo» «Aspekt-Polihraf» (in Ukrainian)
13. Tiutkin, O. L., & Hromova, O. V. (2023). Substantiating the concepts of components composition and method of obtaining soil-cement element for reinforcement of embankments. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 24, 81-92. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/292006> (in Ukrainian)
14. Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791-797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.08.2024

Прийнята до друку: 24.12.2024