

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ І ЩІЛЬНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ

Новицький Є.В., студ. гр. ПЦБ-274

Наукові керівники – Мосічева І.І., к.т.н., доц., Марченко М.В., к.т.н., доц.  
(кафедра Основ і фундаментів, Одеська державна академія будівництва та архітектури)

**Вступ.** Загальний напрямок розглянутого циклу досліджень: експериментальна оцінка характеристик міцності і фільтраційних властивостей металургійних шлаків для обґрунтування можливості їх використання при влаштуванні штучних основ. Відходи металургійного виробництва, що утилізуються, представлені доменними, відвальними та іншими видами шлаків. Водночас у ряді районів, де пісок є дефіцитним матеріалом, зокрема для портів Азовського моря (м. Маріуполь, річковий та морський порти), найбільші металургійні комбінати, розташовані поруч, безперервно «виробляють» та накопичують відходи у вигляді шлаків. Основний обсяг лабораторних випробувань цих шлаків виконано у попередні роки у різних організаціях за участю та під безпосереднім науково-технічним керівництвом доктора технічних наук, професора Школа О.В., який люб'язно запропонував свої архівні матеріали за даними дослідженнями для обробки [1, 2].

**Мета роботи.** Дослідження міцнісних та фільтраційних параметрів металургійних шлаків на предмет обґрунтування їх застосування як штучних основ та засипок відстрочок, а також улаштування фільтраційних елементів при ущільненні слабких ґрунтів у вигляді свердловин, прорізів та пластів.

Назва різновидів металургійних шлаків як відходів виробництв відображає технологічні відмінності в процесі їх отримання. Звичайні металургійні шлаки виходять шляхом простого відсипання у відвали або вироблені кар'єри. Шлаки, які зазнають особливого технологічного процесу, пов'язаного з додатковою обробкою форми їх частинок або компонентів, прийнято називати гранульованими. Перші отримали уточнююче пояснення до загальної назви – не гранульовані (МШНГ), другі – гранульовані (МШГ).

Головною якісною та кількісною, а також фізичною відмінністю цих видів металургійних шлаків є діапазони варіативності форм та крупності частинок (гранул), як елементів їх складу у відсотковому співвідношенні. Визначення основних фізичних характеристик гранулометричного складу шлаків виконано з триразовою повторюваністю у повній відповідності до діючих норм [3], а їх чисельні параметри наведені в табл. 1.

За даними гранулометричного складу будувалися відповідні графічні залежності і за опорними критеріями визначався ступінь неоднорідності шлаків  $C_u$ , підсумкові значення яких наведено в таблиці 2.

Якісний і кількісний аналіз гранулометричного складу показує, що обидва види шлаків, не гранульовані і гранульовані, мають суттєву неоднорідність і, головне, – наявність великих частинок, внаслідок чого вони класифіковані як великоуламкові. Раніше виконаний комплекс компресійних випробувань деформативних властивостей шлаків в одометрі підтвердив необхідність застосування конструктивно збільшеної порівняно зі стандартним приладом установки, розміри якої дозволяють врахувати та отримати адекватність умов досвіду та параметрів шлаків. Тому, за аналогією, зсувні випробування, зважаючи на таку ж явну невідповідність розмірів типових приймальних пристроїв у вигляді напівкілець і розмірів гранул шлаків, було вирішено провести у виготовленій великогабаритній установці, конструктивно збільшеній у порівнянні зі стандартним приладом ВСВ-25 Гідропроєкту.

Попередньо для вибору оптимального співвідношення між розмірами (діаметром) великих включень та розмірами зсувних кілець і зразків були виконані кілька серій пробних або пошукових випробувань. За аналізом їх результатів та з урахуванням адекватного співвідношення крупності частинок шлаків суті одноплосинних зсувних випробувань були

підібрані оптимальні розміри напівкільця (зразків): діаметр 504 мм та висота 200 мм, при цьому площа зрізу становила 2000 см<sup>2</sup>. Максимальні вертикальні та горизонтальні зусилля при випробуваннях не перевищували 10 тс.

Таблиця 1

Таблиця 1 – Гранулометричний склад дослідних шлаків

Металургійні шлаки не гранульовані (МШНГ)									
Діаметри зерен, мм	< 15	< 10	< 7	< 5	< 3	< 2	< 1	< 0,5	< 0,25
%	100	98,7	96,5	92,7	77,4	53,4	6,6	3,0	0,3
Металургійні шлаки гранульовані (МШГ)									
Діаметри зерен, мм	< 40	< 20	< 10	< 5	< 2,5	< 1,25			
%	100	42,1	12,5	2,5	0,6	0,2			

Таблиця 2

Коефіцієнти неоднорідності дослідних видів шлаків

Діаметри зерен у мм забезпеченістю 10% та 60%, відповідно, $d_{10}$ та $d_{60}$ за кривими гранулометричних складів та коефіцієнти їх неоднорідності $C_u = d_{60}/d_{10}$			
Шлаки/діаметр	$d_{10}$	$d_{60}$	$C_u$
МШГ	1,3	2,3	1,77
МШНГ	9	25	2,78

Для призначення величини необхідного та достатнього зазору між обіймами напівкільця, який не впливав би на кінцеві результати випробувань, було проведено кілька методичних серій із фіксованим зазором в інтервалах 5...20 мм для МШНГ та 10...40 мм – для МШГ. Порівняльний аналіз показав, що оптимальний зазор між півкільцями, який практично не позначається на параметрах зсуву і результатах випробувань можна без особливих похибок прийняти рівним 20 мм.

Режим проведення випробувань максимально відповідав вимогам ДСТУ [4]. Єдиною відмінністю від рекомендованого регламенту випробувань було збільшення у 4 та 5 разів швидкості зрізу, відповідно, гранульованих та не гранульованих шлаків. Ця умова задовольняє вимогу норм про обмеження загальної тривалості зрізу не більше 10 хв. Остаточо оптимальні величини зсувів напівкільця при досягненні граничних дотичних напруг прийняті для шлаків МШНГ рівними 20, а для МШГ – 50 мм.

Усього було виконано 108 різних випробувань МШНГ та МШГ як у повітряно-сухому, так і у водонасиченому станах. Кожна серія включала парні дослідження зразків-близнюків за трьох щільностей додавання  $D_0 = 0; 0,5; 1,0$ . Відповідні значення щільностей додавання характеризуються коефіцієнтом пористості  $e$  і обчислювалися за виразом:

$$D_0 = (e_{\max} - e_{\text{прир.}})/(e_{\max} - e_{\min}) \quad (1)$$

Цей ж вираз, для зручності первинного прямого контролю щільності  $\rho$  шлаків у тих же станах, може бути інтерпретовано наступним чином:

$$D_0 = (1 - \rho^{\min}_{\text{прир.}})/(1 - \rho^{\min}_{\text{max}}), \quad (2)$$

де:  $\rho^{\min}_{\text{прир.}} = \rho_{\text{прир.}}^{\min}$ ;  $\rho^{\min}_{\text{max}} = \rho_{\text{max}}^{\min}$ .

У розрахунках при випробуваннях для  $e_{\max}$  та  $e_{\min}$  приймалися дослідні значення щільності для МШГ та МШНГ, відповідно рівними 2,76 та 2,89 г/см<sup>3</sup>. Обчислені середні значення  $\rho_{\max}$ ,  $\rho_{\min}$ ,  $e_{\max}$ ,  $e_{\min}$  наведені у табл. 3.

У табл. 4 і 5 наведено результати граничного опору зсуву  $\tau_{\max}$  та їх середні значення  $\tau_{\text{ср}}$  для обох видів шлаків у повітряно-сухому та водонасиченому станах в інтервалах вертикальних ущільнюючих навантажень 0,5; 1,0 та 2,0 кг/см<sup>2</sup> на зразки.

Підсумкова обробка масивів даних виконаних експериментів дозволила кількісно оцінити значення нормативних кутів внутрішнього тертя та питомого зчеплення з шлаків при

різній щільності додавання як для повітряно-сухого, так і водонасиченого станів, результати яких наведені в табл. 6 та 7.

Таблиця 3

Середні значення характеристик обох видів шлаків

Шлаки	$\rho_{\max}$ , Г/СМ <sup>3</sup>	$\rho_{\min}$ , Г/СМ <sup>3</sup>	$e_{\max}$ , Ч.О.	$e_{\min}$ , Ч.О.
МШГ	1,55	1,20	1,30	0,78
МШНГ	1,32	1,02	1,83	1,19

Таблиця 4

Результати випробувань на зсув шлаків МШГ за різних станів водонасичення

$\rho$ , КГ/СМ <sup>2</sup>	$D_0$	Повітряно-сухий стан				Водонасичений стан			
		$\tau_{\max}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>			$\tau_{\text{ср. max}}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>	$\tau_{\max}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>			$\tau_{\text{ср. max}}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>
0,5	0	0,31	0,32	0,33	0,32	0,35	0,32	0,34	0,34
	0,5	0,50	0,52	0,54	0,52	0,46	0,38	0,54	0,46
	1,0	0,64	0,66	0,68	0,66	0,77	0,74	0,71	0,72
1,0	0	0,63	0,66	0,69	0,66	0,63	0,60	0,62	0,62
	0,5	0,94	0,83	0,91	0,89	0,80	0,60	0,88	0,81
	1,0	1,31	1,39	1,00	1,10	1,31	1,11	0,91	1,11
2,0	0	1,56	1,33	1,19	1,33	1,11	1,16	1,14	1,14
	0,5	1,76	1,64	1,56	1,64	1,67	1,56	1,42	1,53
	1,0	1,79	2,15	1,62	2,00	2,09	1,81	1,73	1,92

Крім наведених зсувних випробувань, виконано також значний обсяг фільтраційних випробувань шлаків, які переслідували такі цілі:

- шлаки за своїм складом і структурою є прекрасним фільтруючим матеріалом, причому внаслідок неоднорідності гранулометричного складу вони можуть частково виконувати або служити як «зворотний фільтр»;

- при постійному водонасиченні вони утворюють практично монолітну пористу структуру із міцністю на стиск до 0,5...1,0 МПа;

- використання металургійних шлаків як дренажного матеріалу дозволяє вирішити важливу екологічну проблему утилізації інших відходів металургійного виробництва.

Таблиця 5

Результати випробувань на зсув шлаків МШНГ за різних станів водонасичення

$\rho$ , КГ/СМ <sup>2</sup>	$D_0$	Повітряно-сухий стан				Водонасичений стан			
		$\tau_{\max}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>			$\tau_{\text{ср. max}}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>	$\tau_{\max}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>			$\tau_{\text{ср. max}}$ , КГ/СМ <sup>2</sup>
0,5	0	0,72	0,68	0,62	0,67	0,71	0,65	0,72	0,71
	0,5	0,91	0,97	0,93	0,93	0,78	0,75	0,83	0,80
	1,0	0,97	1,23	1,14	1,13	1,13	1,02	1,07	1,09
1,0	0	1,20	1,20	–	1,20	1,04	1,19	1,15	1,13
	0,5	1,44	1,49	1,47	1,46	1,28	1,33	1,30	1,30
	1,0	2,19	1,51	1,64	1,65	1,60	1,62	1,50	1,57
2,0	0	2,13	2,04	1,99	2,06	1,94	1,86	1,81	1,90
	0,5	2,25	2,33	2,48	2,40	2,20	2,20	–	2,20
	1,0	2,83	2,77	2,60	2,70	2,47	2,51	2,58	2,52

Зазначений комплекс лабораторних випробувань та аналіз результатів їх фільтраційних властивостей показали перспективність і доцільність застосування металургійних шлаків для влаштування вертикальних фільтраційних дрен, а також як дренальний шар по покрівлі слабких, у тому числі мулистих ґрунтів. Серія визначень величини коефіцієнта фільтрації виконані при п'яти значеннях відносної густини  $D_0$  – 0; 0,25; 0,50; 0,75 и 1,00 [5]. Кількісні результати цих випробувань наведено в табл. 8.

Таблиця 6

Нормативні значення кута внутрішнього тертя шлаків МШГ та МШНГ при різних станах водонасичення та щільності додавання

Шлаки	Стан	Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , при коефіцієнті відносної щільності $D_0$ , що дорівнює				
		0	0,25	0,5	0,75	1,0
МШГ	Повітряно-сухий	33,0	35,0	38,0	40,5	43,0
	Водонасичений	28,5	31,0	34,0	36,5	39,0
МШНГ	Повітряно-сухий	42,5	43,5	44,5	45,5	46,5
	Водонасичений	40,0	41,0	42,0	43,0	44,0

Таблиця 7

Нормативні значення питомого зчеплення шлаків МШГ та МШНГ при різних станах водонасичення та щільності додавання

Шлаки	Стан	Питоме зчеплення $c$ , МПА, при коефіцієнті відносної щільності $D_0$ , що дорівнює				
		0	0,25	0,5	0,75	1,0
МШГ	Повітряно-сухий	0	0,005	0,01	0,015	0,02
	Водонасичений	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03
МШНГ	Повітряно-сухий	0,02	0,030	0,04	0,050	0,06
	Водонасичений	0,03	0,040	0,05	0,060	0,07

Таблиця 8

Значення коефіцієнтів фільтрації при фіксованих величинах відносної щільності металургійних шлаків

Шлаки	Стан	Коефіцієнт фільтрації шлаків $k_f$ , м/сут. при коефіцієнті відносної щільності $D_0$ , що дорівнює				
		0	0,25	0,50	0,75	1,00
МШГ	Водонасичений	72,3	38,7	35,2	18,2	15,1
МШНГ	Водонасичений	68,2	30,3	25,3	12,5	10,0

### Висновки та результати:

1. Міцні характеристики обох видів металургійних шлаків як не гранульованих, так і гранульованих функціонально залежать переважно від щільності їх складання та, щонайменше, – від вологості.

2. При переході від гранично пухкого складання ( $D_0 = 0$ ) до гранично щільного ( $D_0 = 1$ ) у гранульованих шлаків кут внутрішнього тертя  $\varphi$  зростає на 30%, а у не гранульованих – на 7%.

3. Значення питомого зчеплення  $c$  у гранульованих шлаків, відповідно, збільшується практично в два, а у не гранульованих – у три рази.

4. Встановлено тісний кореляційний зв'язок між значеннями коефіцієнтом фільтрації та відносною щільністю шлаків. Так збільшення відносної густини від нуля до одиниці зменшує значення коефіцієнта фільтрації для обох видів шлаків склало від 4,8 до 6,8 разів.

5. Узагальнені результати всебічних комплексних досліджень міцнісних та фільтраційних властивостей шлаків дозволяють обґрунтувати можливість їх широкого застосування як штучних основ, так і фільтруючих елементів на об'єктах промислового та цивільного будівництва.

6. Для перевірки достовірності, надійності та ефективності такого використання металургійних шлаків необхідно і слід виконати як модельні лабораторні, так і польові натурні дослідження їх довготривалої роботи під час зведення реальних об'єктів для характерних експлуатаційних режимів та навантажень.

### Література:

1. Школа А.В. Диагностика портовых сооружений. Часть 2. Деформации и надежность. Одесса: МАГ ВТ, 2009. С. 299-581.

2. Школа А.В. Проекты развития портов Украины. Одесса: «Рекламсервиз», 2009. 240 с.

3. ДСТУ Б В.2.1-2-96. Ґрунти. Класифікація. Київ: Укрархбудінформ, 1997. 42 с.

4. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості. Київ, 1997. 101 с.

5. Мосічева І.І. Передбудівельне ущільнення слабких основ портових територій в особливих умовах дренажування: автореф. дис. На здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.02 – основи та фундаменти. Одеса: ОДАБА, 2017. 22 с.

6. Школа А.В., Страхов Ю.Г. Реконструктивные решения для причалов эстакадного типа в Мариупольском порту. Строительные материалы, конструкции и инженерные системы. Одесса: ОГАСА, 1996. С. 246-252.

7. Школа О.В., Мосічева І.І., Марченко М.В., Котляр А.С. Фізико-механічні показники металургійних шлаків як матеріалу для створення штучних територій морських терміналів і засипок оторочок // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво». Одеса: ОДАБА, 2021. С. 91-93.

8. Школа О.В., Марченко М.В., Мосічева І.І., Потапов А.А. Metallurgical slags as a structural soil environment of artificial territories of marine terminals. Матеріали одинадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Чернігів, 2021. С. 98-99.