

Л. В. Трикоз, О. С. Зінченко, А. В. Никитинський

Український державний університет залізничного транспорту, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНІСНИХ ТА СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНИХ РОЗЧИНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ

У статті наведено результати досліджень міцності та густини цементно-піщаного розчину, в якому пісок частково замінено на дрібний наповнювач із відходів подрібнення залізобетонних залізничних шпал. Отримано експериментальні залежності міцності та густини при різних співвідношеннях пісок : наповнювач. Показано, що максимально ущільнена структура утворюється при коефіцієнті розсуву частинок піску  $\mu_{opt} = 3,0$ . Для оптимального значення  $\mu$  виконано розрахунки і побудовано графічні залежності, які дозволяють визначити потрібний середній розмір частинок наповнювача в залежності від середнього розміру частинок піску для отримання найбільш щільної структури під час проектування складів цементно-піщаних розчинів. Використання відходів зменшить кількість площ, необхідних для їх зберігання, та зменшить обсяги видобування природнього піску.

**Ключові слова:** цементно-піщаний розчин; наповнювач; коефіцієнт розсуву частинок піску; міцність; щільність

### Постановка проблеми.

Переробка відходів бетонних конструкцій є ефективним способом скорочення будівельних відходів та необхідних площ для їх розміщення. Також повторне використання крупних та дрібних заповнювачів зменшить їх видобуток із природних родовищ, попереджуючи їх виснаження. Згідно з Національною стратегією управління відходами в Україні [1] передбачено кілька важливих кроків для розвитку ринку використання перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт:

1. Встановлення нормативів для перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, що сприятиме повторному використанню та утилізації цих матеріалів.

2. Розробка нормативів використання вторинної сировини з відходів будівельно-ремонтних робіт як матеріалів у будівельній галузі.

3. Створення механізмів гарантування якості перероблених матеріалів та надання економічних стимулів для їх використання.

4. Розвиток ринку перероблених матеріалів з відходів будівельно-ремонтних робіт.

5. Інтеграція планів управління відходами будівельно-ремонтних робіт до проектно-кошторисної документації щодо будівництва та реконструкції будівель та споруд.

Ці заходи сприятимуть створенню більш стійкого та екологічно обізнаного будівельного сектору.

Зруйнований бетон можна використовувати повторно, отримуючи з нього крупний та дрібний заповнювач для виробництва будівельних матеріалів та виробів [2]. Це екологічно обґрунтований підхід, який дозволяє зберегти ресурси та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Завдяки різним методам обробки [3] і повному очищенню рециркульований крупний заповнювач не суттєво впливатиме на властивості бетону на відміну від переробленого дрібного заповнювача, який містить велику кількість гідратованого цементного каменю і має більшу пористість і водопоглинання. У результаті бетон, що містить перероблений дрібний заповнювач, має меншу міцність та довговічність, ніж бетон із натуральним піском. Однак те, як гранулометричний склад рециркульованого дрібного заповнювача впливає на властивості матеріалів, залишається не повністю дослідженим. Отже, встановлення таких залежностей є актуальним науково-практичним завданням.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Повторне використання переробленого заповнювача для одержання будівельного розчину може ефективно скоротити кількість відходів будівництва та знесення. У роботі [4] вивчалось перенесення хлоридів та покращення стійкості цементно-піщаного розчину, що містить як заміну піску мелені відходи бетону з розміром частинок, менших за 2,36 мм. Ці відходи мають меншу насипну густину ( $2320 \text{ кг/м}^3$ ) і набагато більше

водопоглинання (9,8 %), ніж річковий пісок, що призводить до того, що при приготуванні розчину з рециркульованими наповнювачами необхідно враховувати додаткову кількість води. Результати свідчать, що повна заміна піску меленими відходами призводить до зменшення міцності цементно-піщаного розчину при стиску на 20 % (з 35 МПа на натуральному піску до 20 МПа на рециркульованому). Результати на проникнення хлоридів показали, що після витримування зразків у 5,0 % розчині NaCl протягом 120 днів у зразках з відходами вміст хлоридів виявився більше у два рази, а коефіцієнт дифузії у півтора рази більше порівняно зі звичайним піском. Для усунення негативного ефекту авторами було модифіковано зразки цементно-піщаного розчину введенням мікронаповнювачів – золи-винесення, метакаоліну і кремнезему. Це дозволило збільшити міцність при стиску до 33 МПа, вдвічі знизити вміст хлоридів після витримування у розчині та втричі зменшити коефіцієнт дифузії з  $10 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ .

У дослідженні [5] дрібна фракція відходів бетону із двох сортувальних заводів була використана для приготування нового будівельного розчину та для заміни природного піску. Було вивчено два водоцементні співвідношення з трьома коефіцієнтами заміщення: 0 %, 30 % і 100 %. Результати показали, що розчини, приготовані з дрібних перероблених заповнювачів, поступалися розчину, приготованому з первинного заповнювача. Міцність на стиск знизилася, а проникність збільшилася. Автори дійшли висновку, що запобігти зниженню міцності можливо регулюванням водоцементного відношення (В/Ц). Було показано, що міцність 47 МПа, яку було отримано при В/Ц = 0,6 на природному піску, може бути досягнута при зниженні В/Ц до 0,56 із 30 %-ою заміною рециркульованим наповнювачем, або при зниженні В/Ц до 0,45 із 100 %-ою заміною меленими відходами. Ці залежності можна використовувати для оцінки екологічної ефективності використання дрібних перероблених заповнювачів для виготовлення нового бетону.

Важливою сферою, де можна використовувати будівельні відходи знесення, є самоущільнювальні розчини [6]. У цьому дослідженні заповнювач з відходів цементно-піщаного розчину, отриманий шляхом механічного дроблення та подрібнення, використовувався в нових сумішах шляхом заміни різних пропорцій (від 5 % до 40 %) за масою природного заповнювача. Фізичні і механічні властивості отриманих зразків визначалися через 3, 7 і 28 днів для різних умов твердіння (у вапняковій воді, у повітрі, під дією тепла). Заміна 40 % природного піску призвела до очікуваного зменшення середньої густини цементно-піщаного

розчину з  $2156 \text{ кг}/\text{м}^3$  до  $2048 \text{ кг}/\text{м}^3$  незалежно від умов твердіння. Але найбільшу міцність при вигині і стиску показали зразки із 10 %-ою заміною піску меленими відходами, які тверділи 28 днів у вапняковій воді – 63,8 МПа, що було на 5 % більше міцності зразків без заміни наповнювача. Проведений авторами рентгенофазовий аналіз цих зразків підтвердив більшу кількість новоутворень цементу, що призвело до збільшення міцності.

Виходячи з хімічного та фізичного складу, річковий пісок як дрібний заповнювач можна належним чином замінити альтернативними матеріалами, такими як дробильний пил і гранітний порошок. Авторі дослідження [7] використовували гранітний порошок і дробильний пил як дрібний заповнювач в цементних розчинах. При дослідженні враховувалися об'ємні пропорції суміші 1:3 і 1:6 (цемент:пісок) із співвідношенням гранітний порошок і дробильний пил 30:70 і 100 % дробильного пилу як дрібний заповнювач. Контрольна суміш містила лише річковий пісок як дрібний заповнювач у цементному розчині. Для пропорції суміші 1:3 міцність на стиск контрольної суміші, зі 100 %-ою заміною піску на пил і з співвідношенням порошок:пил 30:70 становила 9,02 МПа, 10,71 МПа і 8,02 МПа відповідно. Це збільшення міцності автори пояснюють зчепленням між частинками через неправильну форму та шорстку текстуру дробильного пилу. При об'ємній пропорції суміші 1:6 (цемент:заповнювач) тенденція розподілу міцності зберігається, але абсолютні величини виявилися вдвічі меншими. З цього випливає необхідність врахування структурного фактору при розробці таких матеріалів.

Про важливість врахування формування структури на мікро- та мезорівнях свідчать результати досліджень [8], в якому природний пісок було замінено переробленим заповнювачем із коефіцієнтами заміни 0, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 80 % і 100 %. Результати випробувань зразків цементно-піщаного розчину показують, що міцність при стиску і вигині демонструють тенденцію спочатку до збільшення, а потім до зменшення зі збільшенням кількості заміщення природного піску. Зокрема, міцність при стиску і вигині досягають свого максимуму при коефіцієнті заміщення 40 % і становлять 5,8 МПа і 2,6 МПа при 28-денному віці затвердіння відповідно, що більше на 10 % і 21 % порівняно зі зразком на натуральному заповнювачі. Візуальні спостереження за допомогою електронно-мікроскопічного аналізу свідчать про те, що шорстка поверхня рециркульованого заповнювача може забезпечити більше центрів зародження для цементу і може сприяти гідратації цементу, щоб утворювати більше гелю C-S-H та етренгіту та ефективно покращувати щільність контактної зони. Хоча

залишилося нез'ясованим, чому саме при 40 % заміщення спостерігається найбільший приріст міцності.

Спроба врахувати розмір частинок перероблених заповнювачів біла здійснена в дослідженні [9], де оцінювали поведінку будівельних розчинів, виготовлених із заповнювачами будівельних відходів і відходів зносу з різними гранулометричними складами, порівнюючи його результати з результатами, отриманими для розчинів, виготовлених із звичайних заповнювачів з тим самим гранулометричним складом. Будівельний розчин, виготовлений із заповнювачем нижче нижньої оптимальної зони (модуль крупності  $M_k < 2,20$ ), показав найгірші фізико-механічні властивості. У розчинах, виготовлених із заповнювачами з модулями крупності  $2,20 < M_k < 2,90$  і  $2,90 < M_k < 3,50$ , не спостерігалось істотних відмінностей у результатах міцності на стиск порівняно з розчином на натуральному піску. На думку авторів така поведінка може бути результатом поєднання двох факторів – кращого ущільнення частинок у цих заповнювачах і кількості води, доступної для суміші розчину. Але автори не запропонували кількісного підходу до такого пояснення, так само як і автори дослідження [10], які вивчали щільність упаковки частинок у певних циліндричних об'ємах. Дослідження сумішей природного і рециркульованого заповнювачів показали, що найбільшу насипну щільність має суміш, яка складається із 25 % дрібного рециклінгового заповнювача і 75 % натурального піску. Бетонна суміш і бетон, виготовлені з використанням такої суміші, демонстрували найкращі показники укладальності, міцності при стиску, вигині і розриві, усадки при висиханні, питомий електричний опір, швидке проникнення хлоридів та мікроструктурні характеристики порівняно з бетоном тільки на природному піску або з більшою кількістю переробленого дрібного заповнювача. Досліджуючи ці параметри, автори [10] мали на меті встановити систематичний зв'язок між розташуванням частинок і міцністю на стиск у бетонних зразках. Ця спроба має важливе значення для задоволення гострої потреби в стійких альтернативах у виробництві бетону, підкреслюючи важливість балансування проблем навколишнього середовища та структурної цілісності в практиці будівництва. Однак, крім опису отриманих залежностей, автори [10] так і не запропонували математичних функцій, які б дозволили врахувати щільне розташування частинок при розрахунках складів бетону або цементно-піщаного розчину.

Виконаний огляд попередніх досліджень свідчить, що використання дрібної фракції відходів руйнування бетонних конструкцій у переважній

кількості випадків призводить до погіршення всіх фізико-механічних показників цементно-піщаних розчинів. Задля уникнення такого ефекту дослідники вдаються до методів ущільнення структури – уведення мікронаповнювачів або регулювання гранулометричного складу, яке відбувається «інтуїтивним» дослідним шляхом перебору варіантів. В Україні для підбору складу таких матеріалів існує нормований параметр – коефіцієнт розсуву зерен піску цементним тістом  $\alpha_{ц.т.}$ , який визначається за емпіричними номограмами [11] без врахування особливостей гранулометричного складу компонентів суміші. Дане дослідження спрямоване на покращення міцнісних характеристик цементно-піщаних розчинів на рециркульованому заповнювачі шляхом підбору складу таких матеріалів на основі структурних характеристик.

### Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є встановлення оптимального співвідношення витрат піску та наповнювача, отриманого із відходів залізобетонних залізничних шпал, із врахуванням їх гранулометричного складу. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: отримати дрібний наповнювач шляхом подрібнення і розсіву відходів шпал; визначити за даними розсіву середній розмір частинок піску і наповнювача; визначити міцність цементно-піщаного розчину із різним співвідношенням піску та наповнювача; встановити оптимальну кількість наповнювача для досягнення найбільшої щільності і міцності; запропонувати метод врахування середнього розміру частинок для проектування складів цементно-піщаного розчину.

### Виклад основного матеріалу.

Як показують численні роботи харківської наукової школи професора Плугіна А. М., для забезпечення найбільшої щільності та міцності матеріалів необхідно дотримуватися правила, що відстань між частинками заповнювача (умовна товщина прошарку) повинна дорівнювати розміру зерен заповнювача на меншому рівні структури. При розрахунках складу бетонів, крім коефіцієнта розсунення зерен щебню  $\alpha$ , запропоновано враховувати коефіцієнт розсунення зерен піску  $\mu$  і коефіцієнт розсунення зерен цементу  $\lambda$  [12]. Для досягнення найбільшої щільності структури необхідно при розрахунках бетону застосовувати оптимальні значення цих трьох параметрів, які визначаються із співвідношення середніх діаметрів заповнювачів відповідних рівнів. В досліджуваному цементно-піщаному розчині як крупний заповнювач використовується пісок кварцовий з модулем крупності 2,0 і середнім розміром частинок 0,47 мм з характеристиками згідно ДСТУ Б В.2.7-189 [13]. Як

наповнювач використовувалася дрібна фракція мелених відходів залізобетонних залізничних шпал із середнім розміром частинок 0,115 мм. Середній розмір визначали розсіюванням на стандартному наборі сит. Для виготовлення зразків як в'язуче використано портландцемент СЕМ І 42,5, який відповідає вимогам ДСТУ Б EN 197-1 [14]. Розрахунок складів цементно-піщаного розчину для з'ясування впливу гранулометричного складу наповнювача здійснювався таким чином.

Кількість піску з урахуванням коефіцієнта розсунення зерен піску  $\mu$  було визначено за формулою із [12]

$$\Pi = \frac{V_0}{\mu_{\text{опт}} \cdot \frac{\Pi_{\text{ус}}^{\Pi}}{\rho_{\text{нас}}^{\Pi}} + \frac{1}{\rho^{\Pi}}}, \quad (1)$$

де  $V_0$  – загальний об'єм цементно-піщаного розчину, м<sup>3</sup>;  $\Pi_{\text{ус}}^{\Pi}$  – пустотність піску, част.од.;  $\rho_{\text{нас}}^{\Pi}$  – насипна густина піску, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho^{\Pi}$  – істинна густина піску, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість води було розраховано за формулою із [12] з врахуванням водопоглинання дрібного наповнювача  $W^H$

$$B = \Pi \cdot \frac{B}{\Pi} + H \cdot W^H, \quad (2)$$

де  $\Pi$  – витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – витрата наповнювача, кг/м<sup>3</sup>;  $B/\Pi$  – водоцементне відношення, част.од.

Задаючись постійною кількістю витрати цементу (500 кг/м<sup>3</sup>) і  $B/\Pi = 0,4$  було розраховано склади цементно-піщаного розчину з різними значеннями коефіцієнт розсунення зерен піску  $\mu$ . Розраховані склади наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Витрата компонентів зразків цементно-піщаного розчину

$\mu$	Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup>				В/Ц
	П	Н	Ц	В	
Контроль	1500	0	500	200	0,4
1,0	1450	50	500	205	0,4
2,0	1000	500	500	250	0,4
3,0	750	750	500	270	0,4
4,0	600	900	500	285	0,4
5,0	550	950	500	295	0,4
6,0	500	1000	500	300	0,4

Після формування зразків-балочок розміром 4×4×16 см вони витримувалися у нормальних умовах протягом 28 діб та у повітряносухих – протягом 90 діб. Визначення міцності на згин і стиск, а також середньої густини визначали згідно з ДСТУ Б В 2.7-187 [15] і ДСТУ Б В 2.7-239 [16]. Результати випробувань наведено на рис. 1 і 2.

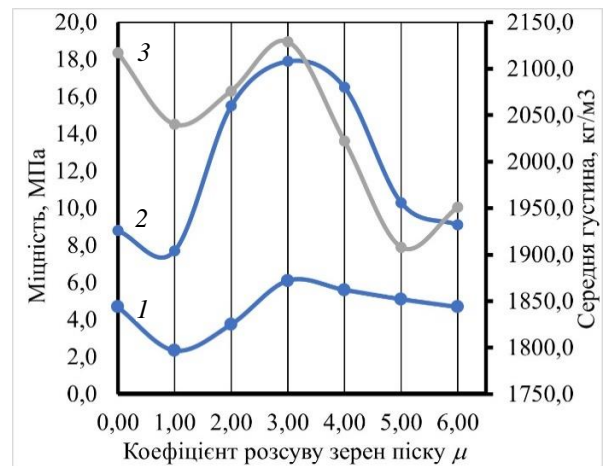


Рис. 1. Міцність на згин (1), стиск (2) та середня густина (3) зразків у віці 28 діб

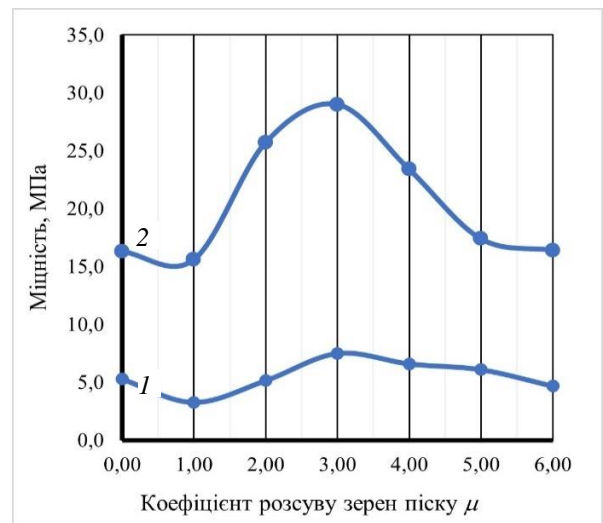


Рис. 2. Міцність на згин (1) та стиск (2) зразків у віці 90 діб

Як показано на рис. 1 та 2, найбільшу щільність та міцність, як у віці 28 діб, так і у віці 90 діб, мають зразки з коефіцієнтом розсунення зерен піску  $\mu_{\text{опт}} = 3,0$ . Це відповідає найбільш щільному розташуванню частинок наповнювача в прошарку між зернами піску (рис. 3).

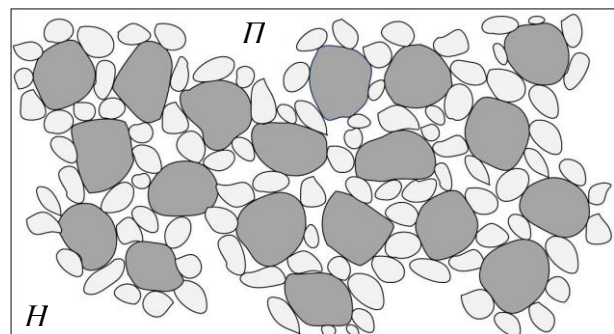


Рис. 3. Умовне розташування частинок піску (П) і наповнювача (Н) при  $\mu_{\text{опт}}$

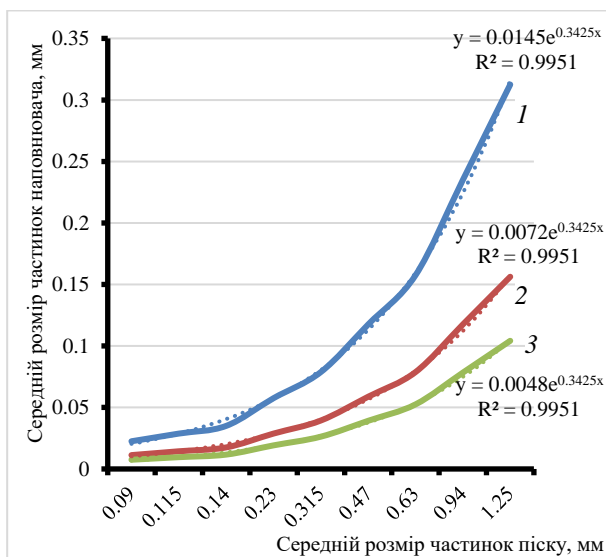
Для того, що визначити співвідношення частинок піску до частинок наповнювача, скористаємося формулою із [12]

$$d^H = \left( \left( \frac{\mu_{\text{опт}} + 1,1}{2,1} \right)^{0,333} - 1 \right) \cdot \frac{d^П}{n}, \quad (3)$$

де  $d^H$  – розмір частинок наповнювача, мм;  $d^П$  – розмір частинок піску, мм;  $n$  – кількість рядів частинок наповнювача між зернами піску.

Формула (3) дозволяє розрахувати середній розмір частинок наповнювача в залежності від середнього розміру частинок піску з урахуванням оптимальної величини розсуву зерен при різній кількості рядів дрібного наповнювача. Результати розрахунку представлені на рис. 4.

Ці дані можна використовувати як номограму для визначення необхідного середнього розміру частинок наповнювача в залежності від вихідних розмірів частинок піску. Наприклад, для розглянутого випадку для середнього розміру частинок піску 0,43 мм для досягнення оптимальної величини розсунення зерен і формування прошарку із частинок в один ряд (рис. 3) середній розмір частинок наповнювача повинен бути 0,117 мм, що близько до експериментально визначеного середнього розміру частинок 0,115 мм мелених відходів бетонних шпал.



1 – n = 1; 2 – n = 2; 3 – n = 3

Рис. 4. Залежність середнього розміру частинок наповнювача від середнього розміру частинок піску при різній кількості рядів n (суцільна лінія – експериментальні дані, пунктирна лінія – лінійна апроксимація)

Отримані криві на рис. 3 апроксимуються рівнянням експоненціальної функції загального виду

$$y = \frac{0,0145}{n} \cdot e^{0,3425x}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість рядів дрібного наповнювача між зернами піску.

Як видно, збільшення кількості рядів наповнювача призводить до необхідності його використання з меншим діаметром частинок і навпаки. Отримані результати можуть слугувати науковим підґрунтям для проектування складів розчинів, в яких використовуються подрібнені відходи бетонних конструкцій змінного гранулометричного складу. У цьому випадку алгоритм застосування запропонованого методу може бути таким: визначення середнього розміру частинок піску; визначення за номограмою (рис. 3) або формулою (4) потрібного середнього розміру меленого наповнювача для забезпечення найщільнішого упакування частинок; визначення кількості цементу в залежності від потрібної консистенції та з врахуванням підвищеного водопоглинання меленого наповнювача.

Оскільки подрібнені відходи бетону мають дуже різний гранулометричний склад в залежності від способу подрібнення, то для практичного застосування більш доцільним є зворотне вирішення задачі – за даними розсіву подрібнених залишків бетонних конструкцій за номограмою визначити необхідну фракцію піску із певним середнім розміром частинок. Наприклад, при використанні найдрібнішої фракції мелених відходів бетонних шпал, яка проходить крізь сито з розмірами отворів 0,09 мм, середній розмір частинок буде складати 0,005 мм. Згідно з номограмою (рис. 4), у цьому випадку може бути використано пісок фракції із середнім розміром 0,23 мм з розташування частинок наповнювача між частинками піску в один ряд (крива 1, рис. 4), із середнім розміром 0,63 мм при розташуванні пілуватих частинок у три ряди (крива 3, рис.4)

## Висновки

У результаті експериментального дослідження цементно-піщаних зразків із наповнювачем, отриманим із подрібнених відходів залізобетонних шпал, встановлено наступне: міцність на стиск і згин і середня щільність у віці 28 діб нормального твердіння змінюються в залежності від кількості наповнювача, яким замінюється частина піску. Найбільші міцність (6,1 МПа на згин і 17,9 МПа на стиск) і щільність (2129 кг/м³) досягаються при коефіцієнті розсунення зерен піску  $\mu_{\text{опт}} = 3,0$ . Така ж тенденція зберігається і для зразків у віці 90 діб повітряносухого зберігання (7,5 МПа на згин і 29,0 МПа на стиск). Це дозволило встановити математичне співвідношення середніх розмірів

частинок піску і наповнювача для досягнення найбільшої щільності і міцності при різній кількості рідів розташування на мезоструктурному рівні. Практична цінність отриманих залежностей полягає в можливості врахування змінного гранулометричного складу наповнювачів із відходів подрібнення бетонних конструкцій. Використання рециркульованих наповнювачів не тільки зменшить земельні ділянки для накопичення таких відходів, але може служити альтернативою для заміни природного піску без виснаження його запасів. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення таких залежностей для заміни цементу на пилувату фракцію подрібнених відходів для розробки складів цементно-піщаного розчину і бетону.

### Література

1. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>.
2. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків, 2023. Вип. 206. С. 121-128. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>
3. Salgado F., Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 2022, 52, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>
4. Ma Z., Zhang Z., Hu R., Liu X., Jiaxin Shen J., Wang C. Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2024, 13(1), 49-67. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>
5. Katz A., Kulisch D. Efficiency of Using Recycled Fine Aggregate for a New Concrete. *Sustainable Built Environment (SBE)*. Regional Conference Zurich, June 15-17. 2016. P. 404-407. Available from: [http://dx.doi.org/10.3218/3774-6\\_65](http://dx.doi.org/10.3218/3774-6_65)
6. Akgul Ü. M., Akgul M. Effect of curing conditions on cement based self-compacting mortar produced with mortar waste aggregate. *Heliyon*, 2024, 10 (16), e36423. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36423>
7. Sharma S., Vyas A. K. A study on use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 93, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.115>
8. Wu E., Ma X., Fang C., Li N., Jia L., Jiang P., Wang W. Strength Performance and Microscopic Mechanism of Cement Mortar Incorporating Fine Recycled Concrete Aggregate and Natural Sand. SSRN: веб-сайт. URL: <https://ssrn.com/abstract=4898706> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4898706>.
9. Kruger P., Serbai P., Chinelatto A. S. A., Pereira E. Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. *Cerâmica*, 2021, 67(383), 269-276. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>
10. Panghal H., Kumar A. Sustainable Concrete: Exploring Fresh, Mechanical, Durability, and Microstructural Properties with Recycled Fine Aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2024, 68(2), 1-15. <https://doi.org/10.3311/PPci.22711>

11. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 86 с.
12. Спосіб визначення складу важкого бетону з мінеральним наповнювачем: пат. 71122 Україна: МПК G01N 33/38 C04B 28/00. № 2003087901; заявл. 21.08.2003; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6. 12 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-189:2009 Будівельні матеріали. Пісок стандартний для випробувань цементів. Технічні умови. [Чинний від 2009-12-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 25 с.
14. ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT). [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 46 с.
15. ДСТУ Б В 2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. [Чинний від 2010-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 15 с.
16. ДСТУ Б В 2.7-239:2010 Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань. [Чинний від 2011-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 34 с.

### References

1. National waste management strategy in Ukraine until 2030. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>. [in Ukrainian].
2. Trykoz, L. V., Zinchenko, O. S., Nykytynskyi, A. V., & Romanenko, O. V. (2023). Particle-size distribution assessment of the recycled aggregates from concrete remains. *Collection of scientific works of UkrDUZT*, 206, 121-128. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>
3. Salgado, F., & Silva, F. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52, Article 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>
4. Ma, Z., Zhang, Z., Hu, R., Liu, X., Jiaxin Shen, J., & Wang, C. (2024). Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(1), 49-67. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>
5. Katz, A., & Kulisch, D. (2016). Efficiency of Using Recycled Fine Aggregate for a New Concrete. *Sustainable Built Environment (SBE)*, Zurich, 404-407. [http://dx.doi.org/10.3218/3774-6\\_65](http://dx.doi.org/10.3218/3774-6_65)
6. Akgul, Ü. M., & Akgul, M. (2024). Effect of curing conditions on cement based self-compacting mortar produced with mortar waste aggregate. *Heliyon*, 10(16), Article e36423. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36423>
7. Sharma, S., & Vyas, A. K. (2023). A study on use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 93, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.115>
8. Wu, E., Ma, X., Fang, C., Li, N., Jia, L., Jiang, P., & Wang, W. (2024). Strength Performance and Microscopic Mechanism of Cement Mortar Incorporating Fine Recycled Concrete Aggregate and Natural Sand. SSRN: website. Retrieved from <https://ssrn.com/abstract=4898706>
9. Kruger, P., Serbai, P., Chinelatto, A. S. A., & Pereira, E. (2021). Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. *Cerâmica*, 67(383), 269-276. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>
10. Panghal, H., & Kumar, A. (2024). Sustainable Concrete: Exploring Fresh, Mechanical, Durability, and Microstructural Properties with Recycled Fine Aggregates. *Periodica*

*Polytechnica Civil Engineering*, 68(2), 1-15.

<https://doi.org/10.3311/PPci.22711>

11. DSTU-N B V 2.7-299:2013. Guidelines for determining the composition of heavy concrete. [Effective from 2014-07-01]. Publ. off. Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine, 2014. 86 p. [in Ukrainian].

12. The method of determining the composition of heavy concrete with mineral filler: pat. 71122 Ukraine: IPC G01N 33/38 C04B 28/00. No. 2003087901; statement 21.08.2003; published 15.06.2006, Bull. No. 6. 12 p. [in Ukrainian].

13. DSTU B V 2.7-189:2009 Building materials. Standard sand for cements testing. Specifications. [Effective from 2009-12-01]. Publ. off. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 25 p. [in Ukrainian].

14. DSTU B EN 197-1:2015 Cement. Part 1. Composition, specifications and conformity criteria for ordinary cements (EN 197-1:2011, IDT). [Effective from 2016-07-01]. Publ. off. Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine, 2016. 46 p. [in Ukrainian].

15. DSTU B V 2.7-187:2009 Building materials. Cements. Methods of determining bending and compressive strength. [Effective from 2010-08-01]. Publ. off. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 15 p. [in Ukrainian].

16. DSTU B V 2.7-239:2010 Building materials. Construction solutions. Test methods. [Effective from 2011-08-01]. Publ. off. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 34 p. [in Ukrainian].

**Автор:** ТРИКОЗ Людмила Вікторівна,  
доктор технічних наук, професор, професор  
кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд  
Український державний університет залізничного транспорту  
Liudmyla TRYKOZ,

*Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Building Materials, Constructions and Structures*

*Ukrainian State University of Railway Transport*

*E-mail – [lvtrikoz@ukr.net](mailto:lvtrikoz@ukr.net)*

*ID ORCID: 0000-0002-8531-7546*

**Автор:** ЗІНЧЕНКО Олексій Сергійович,  
аспірант кафедри будівельних матеріалів,  
конструкцій та споруд  
Український державний університет залізничного транспорту

Oleksii ZINCHENKO,

*PhD student Department of Building Materials, Constructions and Structures*

*Ukrainian State University of Railway Transport*

*E-mail – [potatosrumba@gmail.com](mailto:potatosrumba@gmail.com)*

*ID ORCID: 0009-0000-3858-8258*

**Автор:** НИКИТИНСЬКИЙ Андрій Володимирович,  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри  
будівельних матеріалів, конструкцій та споруд  
Український державний університет залізничного транспорту

Andrii NYKYTYNSKYI,

*PhD, associate professor, associate professor of the Department of Building Materials, Constructions and Structures*

*Ukrainian State University of Railway Transport*

*E-mail – [NykytynskyiAV@kart.edu.ua](mailto:NykytynskyiAV@kart.edu.ua)*

*ID ORCID: 0000-0002-4923-8568*

## DETERMINATION OF STRENGTH AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CEMENT-SAND MORTARS WITH RECYCLING FILLERS

L. Trykoz, O. Zinchenko, A. Nykytynskyi

Ukrainian State University of Railway Transport

*The article presents the study results of the strength and density of a cement-sand mortar where the sand is partially replaced with a fine-dispersed filler from the waste of grinding reinforced concrete sleepers. Experimental dependences of strength and density at different ratios of sand:filler were obtained. The compressive and flexural strength as well as the average density at the age of 28 days of normal hardening depend on the amount of filler that replaces part of the sand. It is shown that the maximally compacted structure is formed at the move apart coefficient of sand grains  $\mu_{opt} = 3.0$ . In this case, the biggest strength (6.1 MPa for bending and 17.9 MPa for compression) and density (2129 kg/m<sup>3</sup>) are achieved. The same trend is observed for samples that be cared 90 days of air-dry storage (7.5 MPa for bending and 29.0 MPa for compression). For the optimal value of  $\mu$ , calculations were made and graphic dependencies were built. They allow to determine the required average size of filler particles depending on the average size of sand particles to obtain the most dense structure when designing cement-sand mortar compositions. This made it possible to establish a mathematical ratio of the average sizes of sand particles and filler to achieve the highest density and strength with different numbers of rows at the mesostructural level. The practical value of the obtained dependencies is the possibility of taking into account the variable granulometric composition of fillers from the waste of grinding concrete structures. The use of recycled aggregates will not only reduce the area for their accumulation, but can also be an alternative to replacing natural sand without depleting its reserves. Further research will be aimed at establishing such dependencies for the replacement of cement with the dust-like fraction of crushed waste for the development of cement-sand mortars and concrete compositions.*

**Keywords:** cement-sand mortar; filler; sand-move apart coefficient; strength; density grain-spreading coefficient