

Л.В. Трикоз, О.С. Зінченко

Український державний університет залізничного транспорту

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЦИРКУЛЬОВАНИХ ДРІБНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА МІЦНІСНІ ТА СТРУКТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНИХ РОЗЧИНІВ

У статті представлені результати досліджень міцності цементно-піщаного розчину, де частина цементу замінена дрібним наповнювачем з відходів подрібнення залізничних залізобетонних шпал. Було отримано експериментальні залежності міцності при згині і стиску при різних співвідношеннях цемент : наповнювач. Виконано розрахунки та побудовано графічні залежності, які дозволяють визначити необхідний коефіцієнти розсуву частинок цементу залежно від середнього розміру частинок дрібного заповнювача для досягнення максимально цільної структури при проектуванні складів цементно-піщаних розчинів. Встановлено, що найбільш ущільнена структура досягається при коефіцієнті розсуву частинок цементу частинками більш дрібної фракції  $\lambda_{opt} = 1,7$ . Використання відходів подрібнення бетонних конструкцій зменшить площі, необхідні для їх зберігання, та знизить витрату цементу з одночасним зменшенням викидів  $CO_2$  при його виробництві.

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

### Постановка проблеми

Переробка залишків бетону після знесення або руйнувань є ефективним способом зменшення будівельних відходів та площ для їх зберігання. Повторне використання крупних та дрібних заповнювачів також знижує потребу в їх видобутку з природних родовищ, запобігаючи їх виснаженню. Відповідно до Національної стратегії управління відходами в Україні [1], заплановано кілька ключових заходів для стимулювання ринку використання перероблених будівельних відходів: розробка стандартів для перероблених будівельних відходів, що сприятиме їх повторному використанню та утилізації; створення стандартів для використання вторинної сировини з будівельних відходів як матеріалів у будівельній індустрії; впровадження систем забезпечення якості перероблених матеріалів та надання економічних стимулів для їх застосування; сприяння зростанню ринку матеріалів, отриманих з перероблених будівельних відходів; включення планів управління будівельними відходами до проектно-кошторисної документації для будівництва та реконструкції будівель і споруд. Ці дії допоможуть створити більш стійкий та екологічно свідомий будівельний сектор.

Залишки та відходи бетону можна повторно використовувати для отримання крупного та дрібного заповнювача, який застосовується у виробництві будівельних матеріалів та виробів. Цей

підхід є екологічно виправданим, оскільки допомагає зберегти ресурси та зменшити негативний вплив на довкілля. Застосування різних методів обробки та ретельне очищення рециркульованого крупного заповнювача мінімально впливає на властивості бетону [2]. На відміну від цього, перероблений дрібний заповнювач містить багато гідратованого цементного каменю, має більшу пористість і водопоглинання, що знижує міцність та довговічність бетону порівняно з природним піском. Крім цього, рециркульований дрібний заповнювач має велику кількість пилюватої фракції і низький модуль крупності [3], що перешкоджає повноцінному використанню подрібнених залишків як дрібного заповнювача в бетон. Використання пилюватої фракції як мікронаповнювача для заміни цементу дозволить не тільки утилізувати значні обсяги відходів руйнування бетону, але зменшити потребу в цементі і знизить обсяги викиду вуглецю при його виробництві. Отже, дослідження можливості заміни цементу на пилювату фракцію подрібнених відходів бетону є актуальним науково-технічним завданням.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Використання переробленого заповнювача для виготовлення будівельного розчину може значно зменшити обсяги відходів, що утворюються під час будівництва та знесення. У дослідженні [4] було зроблено спробу врахувати розмір частинок

перероблених заповнювачів. Досліджували властивості будівельних розчинів, виготовлених із заповнювачів з будівельних відходів з різними гранулометричними складами, порівнюючи їх з розчинами, виготовленими з традиційних заповнювачів з аналогічними гранулометричними характеристиками. Будівельний розчин із заповнювачем з модулем крупності менше 2,20 продемонстрував найгірші фізико-механічні властивості. У розчинах із заповнювачами з модулями крупності від 2,20 до 2,90 та від 2,90 до 3,50 не спостерігалось значних відмінностей у міцності на стиск порівняно з розчинами на основі натурального піску. Автори припускають, що це може бути спричинено кращим ущільненням частинок у цих заповнювачах. Проте вони не надали кількісного пояснення цього явища.

Дослідження [5] показали, що повна заміна піску меленими відходами знижує міцність цементно-піщаного розчину на стиск з 35 МПа на звичайному піску до 20 МПа на рециркульованому, підвищує коефіцієнт дифузії у півтора рази і вдвічі – вміст хлоридів після витримування зразків протягом 120 діб у розчині  $NaCl$ . Щоб усунути негативний ефект, автори модифікували зразки цементно-піщаного розчину, додавши мікронаповнювачі – кремнезем, метакаолін і золу-винесення. Це дозволило підвищити міцність на стиск до 33 МПа, зменшити вміст хлоридів після витримування у розчині вдвічі та знизити коефіцієнт дифузії втричі. Така сама тенденція спостерігається і в бетонних зразках під час одночасного використання рециркульованих крупних заповнювачів і нанонаповнювачів. Як показано в [6], 28-денна міцність на стиск бетону, до складу якого входять заповнювачі, модифіковані золою винесення, кремнеземом та нанокремнеземом, зросла на 39,4 %, 55,2 % та 17,6 % відповідно порівняно з бетоном з щебнем без будь-якої модифікації. В іншому дослідженні [7] поверхня перероблених заповнювачів була оброблена двома зміцнюючими розчинами, виготовленими з сульфоалюмінатного цементу та додаванням базальтового порошку. Результати випробувань показали, що якість обробленої поверхні покращилася. Про це свідчило зниження роздавлюваності (на 23 %) і водопоглинання (на 19 %), тоді як механічні властивості та хлорид- і сульфатостійкість бетону покращилися на 33 % і 10 % відповідно. Як встановлено в [8], 28-денна міцність на стиск бетону із заповнювачами, обробленими портландцементом, метакаоліном і нанокремнеземом, збільшилася на 25 %, водопоглинання зменшилося на 7 % і капілярний підйом зменшився на 53 %, коефіцієнт проникнення хлоридів зменшився на 67 %. Відповідно, бетон з переробленими заповнювачами, обробленими

метакаоліном і нанокремнеземом, демонструє більшу міцність, ніж бетон на необроблених заповнювачах.

Однак, більш доцільним і економічно обґрунтованим шляхом було б використати як мікронаповнювач пиловату фракцію тих самих подрібнених відходів, як це було зроблено у дослідженні [9], де автори використовували дробильний пил як дрібний заповнювач у цементних розчинах. Вони розглядали об'ємні пропорції суміші 1:3 і 1:6 (цемент:пісок) із співвідношенням гранітного порошку і дробильного пилу 30:70 або 100 % дробильного пилу. Для суміші з пропорцією 1:3 міцність на стиск при 100%-ій заміні піску на пил становила 9,02 МПа, що не набагато менше міцності контрольної суміші (10,71 МПа). Ці результати свідчать, що при правильно підібраному співвідношенні компонентів може бути досягнута майже така ж міцність, як і для повноцементних зразків.

Іноді результати досліджень не демонструють лінійні залежності зміння характеристик цементно-піщаних розчинів при введенні мікронаповнювачів. Так, результати випробувань цементно-піщаних розчинів показують, що міцність на стиск і вигин спочатку зростають, а потім знижуються зі збільшенням частки заміщення природного піску від 0 % до 100 % [10]. Максимальні значення міцності при стиску і вигині досягаються при коефіцієнті заміщення 40 % і становлять 5,8 МПа та 2,6 МПа, відповідно, на 28 добу твердіння. Спостереження за допомогою електронно-мікроскопічних знімків показують, що шорстка поверхня рециркульованого заповнювача може створювати більше центрів утворення продуктів гідратації цементу та більшу кількість еtringіту і гідросилікатного гелю C-S-H, що ефективно ущільнює контактну зону пиловатого наповнювача із бетонних відходів. Однак автори не пояснили, чому найбільший приріст міцності спостерігається саме при 40 % заміщення.

На протипагу вказаному вище дослідженню, автори роботи [11] отримали найбільший приріст міцності при заміні тільки 10 % цементу на подрібнений наповнювач. Методами рентгенівського дифракційного аналізу, енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії та скануючої електронної мікроскопії було показано, що при нижчих відсотках заміни пуцоланова реакція підвищує міцність шляхом утворення додаткових продуктів гідратації. І навпаки, при вищих рівнях заміни міцність зменшується. Як відомо, наприклад із [12], на 28 добу повна гідратація спостерігається тільки в  $C_3A$  і  $C_4AF$ , при цьому  $C_3S$  гідратується на 70÷75 %, а  $C_2S$  на 45÷50 %, відповідно, кількість негідратованого  $C_3S$  у відходах бетону може

досягати 25 %, а  $C_2S$  – 40÷50%. Ось чому автори [11] вважають, що додатковий цемент навколо перероблених дрібних заповнювачів сприяє виробництву більшої кількості продукту гідратації. Вони зауважили, що при заміні 50 % цементу на подрібнені відходи розвиток портландиту, гідросилікатного гелю та еtringіту менший, ніж у контрольних зразків, що призводить до зниження міцності через неадекватну гідратацію частинок цементу. Наявність частинок, що не прореагували, у затверділому цементному тісті ще більше послаблює бетон. У зразках із 75%-ою заміною цементу було виявлено мінімальну присутність кристалів кальцію гідроксиду на частинках цементного тіста, що вказує на порожнечі та пухку структуру, що призводить до зниження міцності на стиск. 100%-а заміна цементу створює пористу мікроструктуру, оскільки цемент навколо перероблених дрібних заповнювачів не проходить повну гідратацію, утворюючи менше продуктів гідратації. Аналіз електронномікроскопічних знімків показує, що менші пропорції заміни цементу створюють більш щільний гідросилікатний гель, що зміцнює матрицю цементної пасту. Однак надмірна заміна призводить до крихких сумішей і недостатнього виробництва гідросилікатного гелю, що призводить до зниження міцності.

Виконаний огляд попередніх досліджень виявив дещо суперечливі дані, щодо впливу кількості подрібненого наповнювача, яким можна замінити цемент в цементно-піщаному розчині без суттєвого погіршення його властивостей. У даному дослідженні пропонується підхід, заснований на роботах наукової школи професора Плугіна А.М., згідно з яким максимальні щільність і міцність досягаються при певному розташуванні частинок менших розмірів у прошарках між частинками більших розмірів [12]. Але це питання не досліджувалося для наповнювачів, які є відходами подрібнення бетону, що становить наукову новизну цього дослідження.

### Мета і завдання дослідження

Метою роботи є виявлення оптимальних структурних характеристик цементно-піщаного розчину, до яких відноситься коефіцієнт розсуву частинок цементу більш дрібною фракцією як цементу, так і наповнювача із відходів подрібнених залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: розсівом відходів шпал отримати дрібний наповнювач і визначити середній розмір його частинок; для різної відсоткової кількості наповнювача по відношенню до цементу визначити міцність на стиск і згин зразків; встановити оптимальне значення

коефіцієнта розсування частинок цементу дрібною фракцією наповнювача.

### Виклад основного матеріалу

Як показано в [13], для забезпечення найбільшої міцності та щільності при розрахунках складу бетонів, крім коефіцієнта розсування зерен щебню  $\alpha$ , необхідно застосовувати коефіцієнт розсування зерен піску  $\mu$  і коефіцієнт розсування зерен цементу  $\lambda$ . Щоб досягти максимальної щільності структури бетону, при його розрахунках слід використовувати оптимальні значення вказаних параметрів, які визначаються співвідношенням середніх діаметрів заповнювачів різних рівнів структури. Спираючись на цей підхід, попередніми дослідженнями авторів [14] було доведено, що при використанні подрібнених відходів залізобетонних шпал як наповнювача цементно-піщаного розчину оптимальним коефіцієнтом розсуву зерен піску є  $\mu_{opt} = 3,0$  з отриманням міцності при стиску 17,9 МПа на 28 добу. Визначимо величину коефіцієнта розсуву зерен цементу, яка буде оптимальною для досягнення найщільнішого пакування між ними частинок меншого розміру. Для цього скористаємося формулою із [13]:

$$\lambda_{opt} = 2,1 \cdot \left( 1 + \frac{n \cdot d_{min}^n}{d_{max}^n} \right)^3 - 1,1, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість рядків цементних частинок розміром  $d_{min}^n$ , мм, у прошарку між частинками цементу розміром  $d_{max}^n$ , мм. (рис. 1).

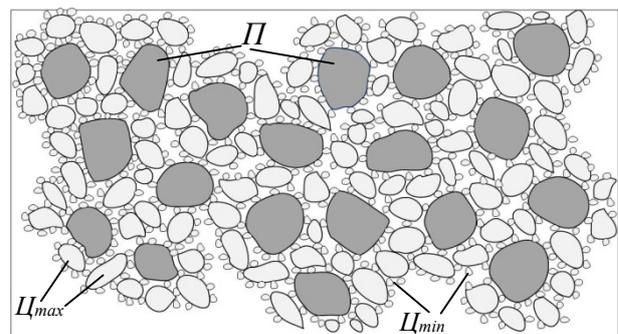


Рис. 3. Умовне розташування частинок цементу розміром  $d_{min}^n$  ( $d_{min}$ ) і розміром  $d_{max}^n$  ( $d_{max}$ ) у прошарках між частинками піску ( $P$ )

Для досліджень використовували цемент за ДСТУ Б EN 197-1 [15] СЕМ І 42,5, в якому частинки цементу найбільш представницької фракції мають розмір 50 мкм. Для виготовлення зразків цементно-піщаного розчину використовували пісок за ДСТУ Б В.2.7-189 [16]. Як наповнювач використовували фракцію після подрібнення відходів залізобетонних залізничних шпал після просіювання через сито з

розміром чарунки 0,09 мм, тобто яка за гранулометричним складом відповідає складу цементу. Отже, для розрахунків приймемо, що частинки найбільш представницької фракції цементу будуть оточені частинками цементу та наповнювача найменшої за розміром фракції 5 мкм). Оптимальне значення коефіцієнту розсунення зерен цементу для одного ряду частинок наповнювача за формулою (1) буде дорівнювати

$$\lambda_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{1 \cdot 0,005}{0,05}\right)^3 - 1,1 = 1,7,$$

а для двох рядів

$$\lambda_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,005}{0,05}\right)^3 - 1,1 = 2,5.$$

Розрахунок складу цементно-піщаного розчину для дослідження впливу кількості наповнювача здійснювався таким чином. Кількість піску з урахуванням коефіцієнта розсунення зерен піску  $\mu$  було визначено за формулою із [13]

$$\Pi = \frac{1}{\mu_{\text{опт}} \cdot \frac{\Pi_{\text{ус}}^{\Pi}}{\rho_{\text{нас}}^{\Pi}} + \frac{1}{\rho^{\Pi}}}, \quad (2)$$

де  $\Pi_{\text{ус}}^{\Pi}$  – 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>.

Об'єм наповненого цементного тіста визначено за формулою із [13]

$$V_{\text{цнв}} = 1000 - \frac{\Pi}{\rho^{\Pi}}. \quad (3)$$

Кількість води було розраховано за формулою із [13] з врахуванням водопоглинання дрібного наповнювача  $W^{\text{H}}$

$$V = \text{Ц} \cdot \frac{V}{\text{Ц}} + \text{Н} \cdot W^{\text{H}}, \quad (4)$$

де Ц – витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>; Н – витрата наповнювача, кг/м<sup>3</sup>; В/Ц – водоцементне відношення, част.од.

Задаючись постійною кількістю витрати піску (800 кг/м<sup>3</sup>) і В/Ц = 0,67 було розраховано склади цементно-піщаного розчину з різним відсотковим вмістом наповнювача по відношенню до маси цементу. Отримані результати розрахунків наведено в табл. 1.

Після виготовлення зразків-балочок розміром 4×4×16 см, вони витримувалися протягом 28 днів в нормальних умовах та протягом 90 днів в повітряно-сухих умовах. Міцність на згин і стиск, а також середню густину визначали відповідно до ДСТУ Б В

2.7-187 [17] і ДСТУ Б В 2.7-239 [18]. Результати випробувань наведені на рисунках 2 і 3.

Таблиця 1  
Витрата складових зразків цементно-піщаного розчину

Відсотковий вміст наповнювача, %	Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup>				В/Ц
	П	Ц	Н	В	
Контроль	800	400	0	270	0,67
10	800	360	40	247	0,67
20	800	320	80	226	0,67
30	800	280	120	206	0,67
40	800	240	160	185	0,67
50	800	200	200	164	0,67

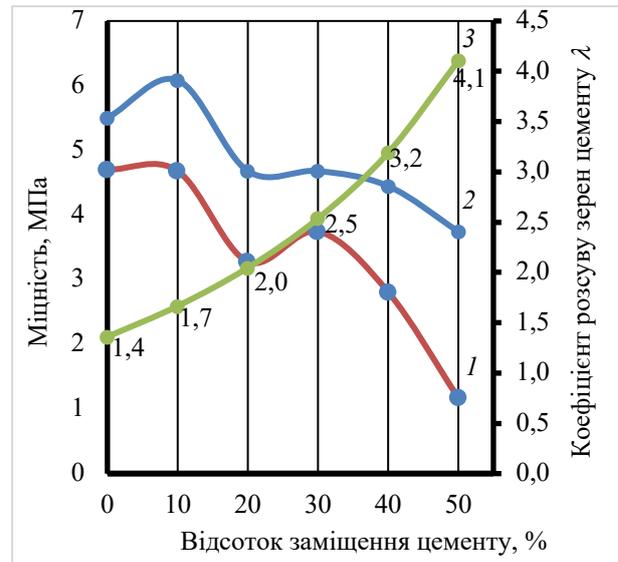


Рис. 2. Міцність на згин зразків у віці 28 днів (1), 90 днів (2) та відповідні значення коефіцієнта  $\lambda$  (3)

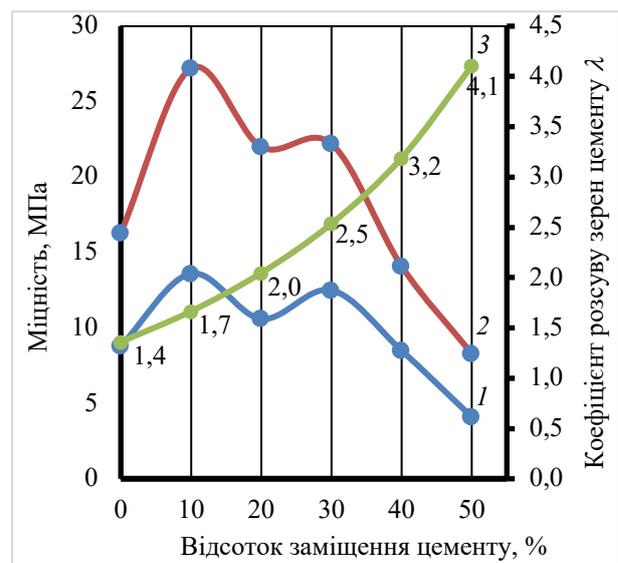


Рис. 3. Міцність на стиск зразків у віці 28 днів (1), 90 днів (2) та відповідні значення коефіцієнта  $\lambda$  (3)

Як показано на рис. 2 та 3, найбільшу міцність, як у віці 28 діб, так і у віці 90 діб, мають зразки з коефіцієнтами розсунення зерен цементу  $\lambda_{\text{опт}} = 1,7$  та  $\lambda_{\text{опт}} = 2,5$ . Це відповідає найбільш щільному розташуванню найдрібніших частинок цементу та наповнювача в прошарку між зернами цементу.

Отримані результати можуть стати науковою основою для розробки складів розчинів, що використовують подрібнені бетонні відходи зі змінним гранулометричним складом. Алгоритм застосування запропонованого методу може виглядати наступним чином:

1. Підготовка даних: визначення середнього розміру частинок піску, цементу та пилюватої фракції відходів подрібнення бетонних конструкцій.
2. Аналіз даних: визначення кількості цементу та води в залежності від потрібної консистенції та з врахуванням підвищеного водопоглинання меленого наповнювача.
3. Інтерпретація результатів: розрахунок складу цементно-піщаного розчину, використовуючи одно з двох оптимальних значень коефіцієнту розсуву зерен цементу дрібною фракцією наповнювача.
4. Впровадження: отримання штучних виробів заданої міцності.

## Висновки

Дослідження цементно-піщаних зразків із наповнювачем, отриманим із подрібнених відходів залізобетонних шпал, показали таке. Міцність на стиск і згин у віці 28 та 90 діб змінюються в залежності від кількості наповнювача, яким заміняється частина цементу. Найбільші міцність (4,7 МПа на згин і 13,6 МПа на стиск) спостерігаються при коефіцієнті розсунення частинок цементу  $\lambda_{\text{опт}} = 1,7$ . Така ж саме закономірність зберігається і для зразків у віці 90 днів (6,1 МПа на згин і 27,2 МПа на стиск). Деяко менші значення були отримані при другому значенні коефіцієнта розсуву частинок цементу  $\lambda_{\text{опт}} = 2,5$ . Це пов'язано з утворенням іншого складу продуктів гідратації цементу при переважанні силікатної складової використаних матеріалів. Отримані результати дозволили встановити математичне співвідношення кількості цементу і наповнювача для досягнення найбільшої щільності і міцності при різній кількості рядів розташування на мікроструктурному рівні, що становить практичну цінність отриманих залежностей. Екологічна значимість результатів полягає у використанні ресайклінгових наповнювачів для зменшення площ. Також часткова заміна цементу зменшить потребу в його виробництві і, як наслідок, викиди вуглецю. Подальші дослідження будуть спрямовані на з'ясування формування структури таких наповнених

складів на субмікрорівні, ґрунтуючись на розгляді продуктів новоутворень цементу.

## 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. Salgado F., Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 52. 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>
3. 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>
4. 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. Vol. 67 (383). P. 269–276. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>
5. 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. Vol. 13(1). P. 49-67. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>
6. Shi C., Wu Z., Cao Z., Ling T.C., Zheng J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 86. P. 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013>
7. Zhang H., Ji T., Liu H., Su S. Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulphoaluminate cement and basalt powder. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 192. P. 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.160>
8. Nóbrega É., Capuzzo V. Properties of Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate Treated with Portland Cement, Metakaolin and Nanosilica. SSRN: веб-сайт. URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4129901>
9. 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. Vol. 93. P. 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.115>
10. 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>
11. Panghal H., Kumar A. Sustainable Concrete: Exploring Fresh, Mechanical, Durability, and Microstructural Properties with Recycled Fine Aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2024. Vol. 68(2). P. 1-15. <https://doi.org/10.3311/PPci.22711>
12. Ahmed A.A.A. Nanodispersed Additive for Composite Binders Based on Technogenic Raw Materials of Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012046>
13. 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.

14. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Науковий вісник будівництва*. 2024. Вип. 111. С. 135-141. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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].
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.jobbe.2022.104452>
3. Trykoz, L. V., Zinchenko, O. S., Nykytynskiy, 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. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685> [in Ukrainian].
4. 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>
5. 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>
6. Shi, C., Wu, Z., Cao, Z., Ling, T.C., & Zheng, J. (2018). Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*, 86, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013>
7. Zhang, H., Ji, T., Liu, H. & Su, S. (2018). Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulphoaluminate cement and basalt powder. *Construction and Building Materials*, 192, 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.160>
8. Nóbrega, E. & Capuzzo, V. (2022). Properties of Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate Treated with Portland Cement, Metakaolin and Nanosilica. SSRN: website. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4129901>
9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. Ahmed, A. A. A. (2020). Nanodispersed Additive for Composite Binders Based on Technogenic Raw Materials of Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 945, Article 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012046>.
13. 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].
14. Trykoz, L. V., Zinchenko, O. S., & Nykytynskiy, A. V. (2024). Determination of strength and structural characteristics of cement-sand mortars with recycling fillers. *Scientific Bulletin of Construction*, 111, 135-141. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17> [in Ukrainian].
15. 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].
16. 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].
17. 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].
18. 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 – [lytrikoz@ukr.net](mailto:lytrikoz@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

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

L. Trykoz, O. Zinchenko

Ukrainian State University of Railway Transport

*The article presents the results of a study of the strength of a cement-sand mortar, where the cement is partially replaced by a fine-dispersed filler from the waste of grinding reinforced concrete sleepers. Experimental dependences of strength at different cement:filler ratios were obtained. The compressive and bending strength at the age of 28 days of normal hardening are nonlinearly dependent on the amount of filler that replaces part of the cement. It is shown that the maximally compacted structure is formed when the cement-move apart coefficient by smaller fraction is  $\lambda_{opt} = 1.7$ . In this case, the greatest strength of 4.7 MPa in bending and 13.6 MPa in compression is achieved at the age of 28 days. The same trend is observed for samples that have been stored for 90 days in air-dry storage (6.1 MPa for bending and 27.2 MPa for compression). For the optimal value of  $\lambda$ , calculations were made, and graphical dependencies were obtained. They make it possible to determine the required average size of particles of fine filler depending on the average size of cement particles to obtain the densest structure when designing cement-sand mortar compositions. This made it possible to establish a mathematical ratio of the average sizes of cement particles and filler to achieve the highest density and strength at a different number of rows at the microstructural level. The practical significance of the obtained dependencies is the possibility of taking into account the variable granulometric composition of fillers from waste grinding of concrete structures. The use of recycled aggregates will reduce the area of their accumulation and become an alternative to replacing cement with a corresponding reduction in carbon emissions during its production. Further research will be aimed at clarifying the formation of the structure of such filled compositions at the submicrostructural level based on consideration of the products of cement new formations.*

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