

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.01:691.322

**ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА, ОТРИМАНОВОГО
З ПОДРІБНЕНИХ БЕТОННИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ШПАЛ**

Асп. О. С. Зінченко

**QUALITY ASSESSMENT OF THE COARSE AND FINE AGGREGATES
FROM GRINDED CONCRETE RAILWAY SLEEPERS**

Postgrad. student O. Zinchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320709>



***Анотація.** У статті наведено результати оцінювання якості вторинних заповнювачів, отриманих із подрібнених залізобетонних шпал, за гранулометричним складом, лежачістю і стиранням. Проведено порівняння результатів визначення за стандартними методами і запропонованим методом обробки зображень. Установлено, що останній дає більш точні і швидкі результати. Уточнено середній розмір частинок щебеню переважальної фракції, ступінь окатаності, час стирання. Використання перероблених заповнювачів зменшить потребу будівельної галузі в природних ресурсах, знизить вартість виробництва бетонних конструкцій і скоротить площу земель, зайнятих будівельним сміттям.*

***Ключові слова:** крупний заповнювач, гранулометричний склад, лежачість, стирання.*

***Abstract.** The increasing urgency of reusing debris from demolished concrete structures is a global issue, not just confined to Ukraine. Current strategies for resource reuse involve crushing concrete waste into recycled aggregate to replace natural aggregate, or into recycled powder to substitute for cement in mortar and concrete. Utilizing construction waste as secondary materials helps reduce the demand for natural resources, decrease carbon footprint, and clears areas of accumulated remains. The aim of the work is to evaluate the quality of aggregates obtained from crushed concrete of railway sleepers. To achieve the goal, the following tasks were set: to determine the particle sizes of aggregate fractions by the standard and accelerated methods; to determine the content of plate-shaped (flaky) and needle-shaped grains by the standard method and the accelerated method; to determine the abrasion time of crushed stone; to compare the obtained data with the standard requirements for concrete aggregates; to give recommendations on the application of the accelerated method for assessing the properties of coarse aggregate. The most representative fraction of coarse aggregate based on the results of sieving is the fraction with an average particle size of 30 mm, while a more accurate image processing method yields an average size of 22.6 mm. Such a discrepancy will lead to errors in calculating concrete compositions and excess cement consumption or obtaining concrete of lower strength. Based on the content of plate-shaped (flake) and needle-shaped grains, determined by the standard method over several hours of measurements, secondary crushed stone belongs to the cubic group of concrete aggregates. An assessment by the image processing method over several minutes yields a circularity of 0.78, which characterizes a greater degree of grain circularity after mechanical processing. The highest percentage of old cement-sand mortar removal occurs in the first 1-1.5 hours, which will form the basis for developing*

a technology for using aggregates from concrete residues. Subsequent studies will be aimed at establishing the quality of sand using the proposed methods for developing express methods for assessing the quality of coarse and fine aggregates, which will allow determining their properties directly at construction sites.

Keywords: coarse aggregate, granulometric composition, flaky, abrasion.

Вступ. Визначення якості кондиційних природних заповнювачів для виробництва бетону – піску і щебеню – регламентовано відповідними нормативними документами [1, 2]. Також передбачено застосування крупних і дрібних заповнювачів із відходів промисловості [3, 4]. У цьому випадку щебінь і пісок походять із гірських порід, що попутно видобувають, та відходів збагачення гірничозбагачувальних підприємств вугільної, металургійної та інших галузей промисловості, із металургійних, паливних та інших шлаків. Додатково дрібний заповнювач може бути виготовлений із золошлакової суміші теплових електростанцій або грубодисперсної золи виносу. На сьогодні в Україні все більше зростає кількість зруйнованих у результаті воєнних дій бетонних конструкцій, які потребують значних площ для їх накопичення і зберігання. Тому актуальною стає проблема їхньої повної переробки для повторного використання з метою відновлення житлового фонду і зруйнованих об'єктів інфраструктури. Оцінювання якості рециклінгових заповнювачів слід здійснювати відповідно до стандартних методів, але особливості походження рециркульованих піску і щебеню потребують пошуку нових більш сучасних і швидких способів встановлення відповідності чинним стандартам. Мета статті – вдосконалення сучасних методів визначення деяких характеристик заповнювачів, зокрема їхнього гранулометричного складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-75 [2] крупний заповнювач для виготовлення бетону оцінюють за

зерновим складом, формою зерен, міцністю, стиранням, вмістом зерен слабких порід, морозостійкістю, вмістом пилоподібних і глинистих частинок, у тому числі глини в грудках, вмістом шкідливих домішок і сполук, радіаційними властивостями і стабільністю фізико-механічних властивостей. Оцінюють якість дрібного заповнювача відповідно до ДСТУ Б В.27-32 [1] за зерновим складом, вмістом пилоподібних і глинистих частинок, у тому числі глини у грудках, вмістом органічних домішок, міцністю (для подрібнених пісків), значенням сумарної питомої активності природних радіонуклідів. Для розрахунку складу бетону найбільше значення мають зерновий склад і форма обох видів заповнювачів. Зерновий склад визначають розсіюванням проби на стандартному наборі сит, а вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми і стирання в поличному барабані встановлюється за ДСТУ Б В.2.7-71 [5]. У розрахунках складів бетону або цементно-піщаного розчину розмір зерен буде впливати на витрати цементу, а форма зерен – на водопотребу і рухливість сумішей. Недоліком стандартного методу визначення зернового складу є неможливість точного встановлення розмірів зерен заповнювачів переважальної фракції, що впливає на точність розрахунку складу бетону і призводить до перевитрат цементу. Визначення форми зерен за стандартним способом є дуже часовитратним і призводить до помилок, що впливає на кількість води для приготування сумішей. Тому деякі дослідники пропонують інші методи визначення розмірів і форми частинок піску і щебеню.

Вторинні заповнювачі бетону складаються з натуральних заповнювачів і

залишків розчину, що прилипли до їхньої поверхні. Кількість, розмір і морфологія прилиплої залишки пасти впливають на якісні аспекти рециклінгових заповнювачів, такі як їхній потенціал зчеплення з новою цементною матрицею в бетоні, а також загальні реологічні та експлуатаційні характеристики бетону. Наприклад, метою дослідження [6] було вивчення впливу зменшення прилиплої затверділої розчину за допомогою методу механічної обробки на характеристики бетону, що містить рециркульований щебінь в різних відсоткових кількостях. Оброблення відбувалося всередині барабана автобетонозмішувача через певні проміжки часу, ефект якого визначено за допомогою аналізу зображень, запису втрат маси та визначення округлості. Було зроблено висновок, що оптимальна тривалість обробки, за якої не відбувається подальше значне видалення прилиплої пасти, становить 3 год, а бетонні суміші, що містять такий вторинний щебінь, демонструють експлуатаційні характеристики, які можна порівняти з характеристиками еталонної бетонної суміші. Що стосується впливу на рухливість бетонних та розчинових сумішей, то традиційні реологічні уявлення переважно розроблено на основі припущень про сферичний заповнювач, тоді як форма частинок – не ідеальне коло, а істотно впливає на реологічні властивості бетону. Тому в дослідженні [7] реологічні властивості бетону зі штучним піском прогнозовані відносно форми частинок заповнювача на основі багаторівневого двофазного припущення. На основі запропонованих моделей вплив форми частинок дрібного та крупного заповнювача на реологічні властивості сумішей може бути пояснений їхнім впливом на відносну товщину плівки цементної пасти і відносну товщину плівки цементно-піщаного розчину відповідно. Запропоноване багаторівневе прогнозування закладає основу для пропорції суміші бетону з

некондиційним заповнювачем відповідно до зазначених реологічних вимог. У цих двох роботах процес визначення округлості форми C складався з початкового обчислення площі та периметра кожної частинки за допомогою програмного забезпечення, а потім із застосуванням рівняння

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}, \quad (1)$$

де A – площа частинки заповнювача, мм²;

P – периметр частинки заповнювача, мм.

Значення округлості можуть коливатися в межах від 0,0 до 1,0, де 1,0 відповідає ідеальному колу. Коли значення наближається до 0,0, це вказує на все більш витягнуту форму. Наприклад, у роботі [6] значення округлості становило 0,66 до механічної обробки в барабанному млині і 0,79 після. Як бачимо, у результаті стирання в барабані форма частинок стала більш округлою на 13 %.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є оцінювання якості заповнювачів, отриманих із подрібненого бетону залізничних залізобетонних шпал. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: визначити розміри частинок фракцій заповнювачів стандартним і прискореним методом, вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми стандартним методом і прискореним, час стирання щебеню; порівняти отримані дані зі стандартними вимогами до заповнювачів бетону; надати рекомендації щодо застосування прискореного методу оцінювання властивостей крупного заповнювача.

Матеріали і методи дослідження. Матеріал для досліджень отримували шляхом подрібнення залишків залізобетонних залізничних шпал у щоківній дробарці і барабанному млині з наступним

вивантажуванням на стандартний набір сит для розділення заповнювачів на фракції. Гранулометричний склад і криву розподілу за розмірами частинок визначали за частковими залишками на ситах після просіювання суміші крупного та дрібного заповнювачів згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [8]. Форму зерен щебеню зернового складу крупного заповнювача, тобто вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми, встановлювали шляхом вимірювання сторін кожної щебеніни і визначали кількістю зерен, товщина яких втричі і більше менша за довжину відповідно до ДСТУ Б В.2.7-71 [5]. Стирання (знос) щебеню визначали за втратою маси зерен при обертанні проби в барабані з металевими кулями згідно з ДСТУ Б В.2.7-71 [5]. Підготовлену пробу завантажували в поличковий барабан разом із сталевими кулями і приводили його в обертання зі швидкістю 33 об/хв. Після закінчення випробування вміст барабана просіювали через сито з отворами діаметром 5 мм і контрольне сито з сіткою № 1,25. Залишки на ситах з'єднували і зважували.

Для прискороного визначення розмірів зерен щебеню в роботі застосовано нестандартний метод, сутність якого

полягає в такому. За допомогою фотокамери отримували цифрові зображення заповнювачів і обробляли за допомогою програмного забезпечення ImageJ, яке є у вільному доступі для використання. Після певних перетворень зображень програма визначає площу кожної частинки, її периметр і округлість за формулою (1). На основі відомої площі проводили розрахунок еквівалентного діаметра кожної частинки, визначали інтервали діаметрів і кількість частинок, які потрапляють у ці інтервали, і будували за результатами криву розподілу частинок за розмірами.

Основна частина досліджень.
Визначення розмірів частинок фракцій заповнювачів стандартним методом. Для побудови кривої розподілу за розмірами частинок було визначено часткові залишки на ситах після просіювання суміші крупного та дрібного заповнювачів. Середній розмір частинок кожної фракції розраховували як середнє арифметичне значення розмірів отворів сітки двох сусідніх сит. Часткові залишки на ситах наведено в таблиці, а діаграму розподілу частинок за розмірами – на рис. 1.

Таблиця

Залишки частинок на ситах суміші заповнювачів

Розміри отворів контрольних сит, мм	Середній розмір частинок фракції, мм	Часткові залишки на ситах, %
пройшло через сито 0,16	0,08	28,37
0,16	0,24	11,15
0,315	0,47	1,78
0,63	0,94	0,32
1,25	1,88	0,76
2,5	3,35	1,42
5	7,5	5,50
10	15	18,97
20	30	31,72
40		0

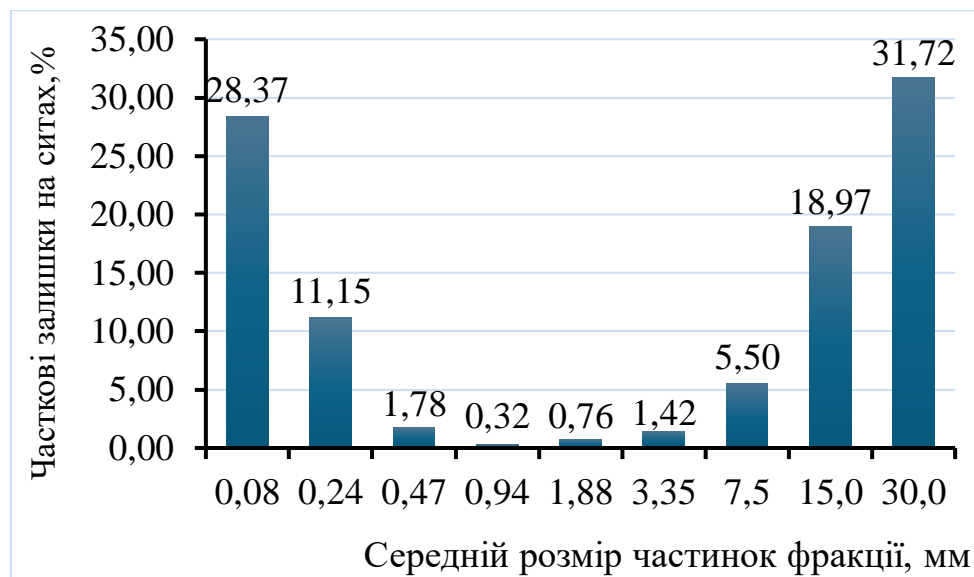


Рис. 1. Діаграма розподілу частинок суміші заповнювачів за розмірами

Як видно з рис. 1, переважальними є дві фракції із середніми розмірами 0,08 і 30 мм.

Визначення вмісту зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми стандартним методом. Співвідношення розмірів зерен щебеню визначали за допомогою штангенциркуля. Для порівняння результатів оцінювали два види крупного заповнювача – природний і рециркульований щебінь. Із кожного виду заповнювача було відібрано пробу масою 1 кг, виміряно всі сторони кожного зерна щебеню і визначено у відсотках кількість частинок, для яких один розмір втричі і більше перевищує розмір інших сторін зернини. У результаті дослідження встановлено, що відсоток зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми для натурального щебеню становить 16,7 %, вторинного після подрібнення в барабанному млині – 14,6 %. За ДСТУ Б В.2.7-74 [4], природний щебінь належить до покращеної групи за формою зерен (нормований відсоток від 15 до 25 %), а рециклінговий щебінь – кубоподібної групи (нормований відсоток від 10 до 15 %).

Визначення стирання (зносу) щебеню. Вторинний щебінь із подрібнених залізничних шпал містить багато старого цементно-піщаного розчину, який потрібно

видалити для покращення адгезії нового розчину під час виготовлення нового бетону на рециклінгових заповнювачах. Час механічної обробки може коливатися від двох до п'яти годин. Для пришвидшення зняття залишків різними авторами рекомендовані попередній нагрів [9], обробка кислотою [10], ультразвукові хвилі [11] або їх комбінація. Для визначення часу, необхідного для видалення залишків цементно-піщаного розчину, пробу масою 2 кг завантажували в барабанний млин і кожні 30 хв (що відповідає 1500 обертам млина) вивантажували на сито розміром 20 мм і визначали масу залишку на ситі. Під час обертів у млині металеві кулі і перекошування частинок сприяли очищенню поверхні щебеню, і початкова маса проби зменшувалася, що показано на рис. 2. Для покращення стирання налиплого розчину в дослідженні застосовували кулі різного діаметра, як було показано в попередньому дослідженні [12].

Як бачимо, найбільше очищення (найбільші втрати маси) відбувається в перші одну-дві години, за чотири години втрати маси становлять майже 50 %, а тривалість обробки понад п'ять годин неефективна, оскільки майже нема втрат маси.

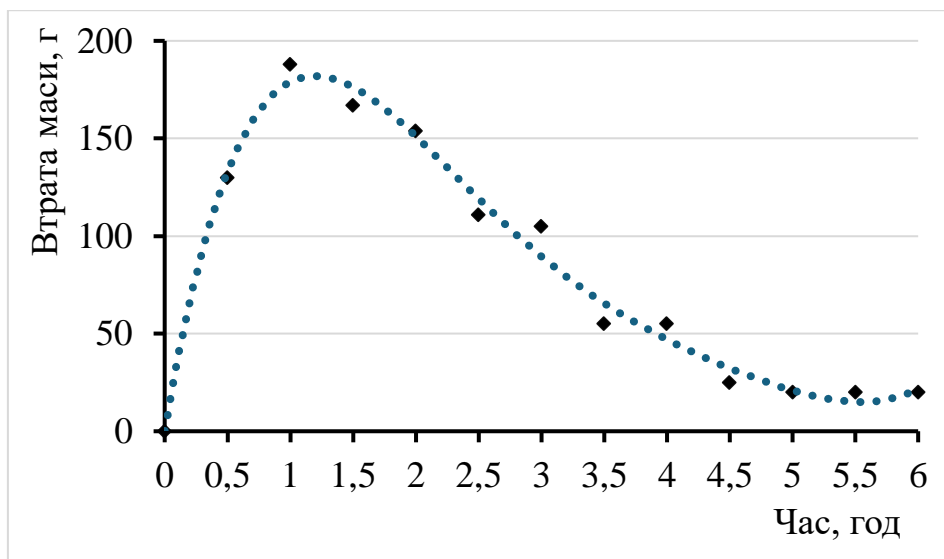


Рис. 2. Втрати маси крупного заповнювача залежно від часу обробки

Визначення форми і розмірів частинок фракцій заповнювачів методом обробки зображень. Як зазначено вище, метод визначення середнього розміру частинок фракцій заповнювачів за середнім арифметичним значенням розмірів отворів сусідніх сит є неточним. Більш точні результати дає безпосереднє вимірювання розмірів кожної частинки щебеню штангенциркулем або розмірів частинок

піску седиментаційним аналізом. Недоліком цих методів є великі витрати часу на вимірювання і обробку результатів. У роботі розміри частинок визначали способом обробки фотографій рециркульованих заповнювачів після механічного очищення від залишків цементно-піщаного розчину в барабанному млині, результати етапів якого наведено на рис. 3.

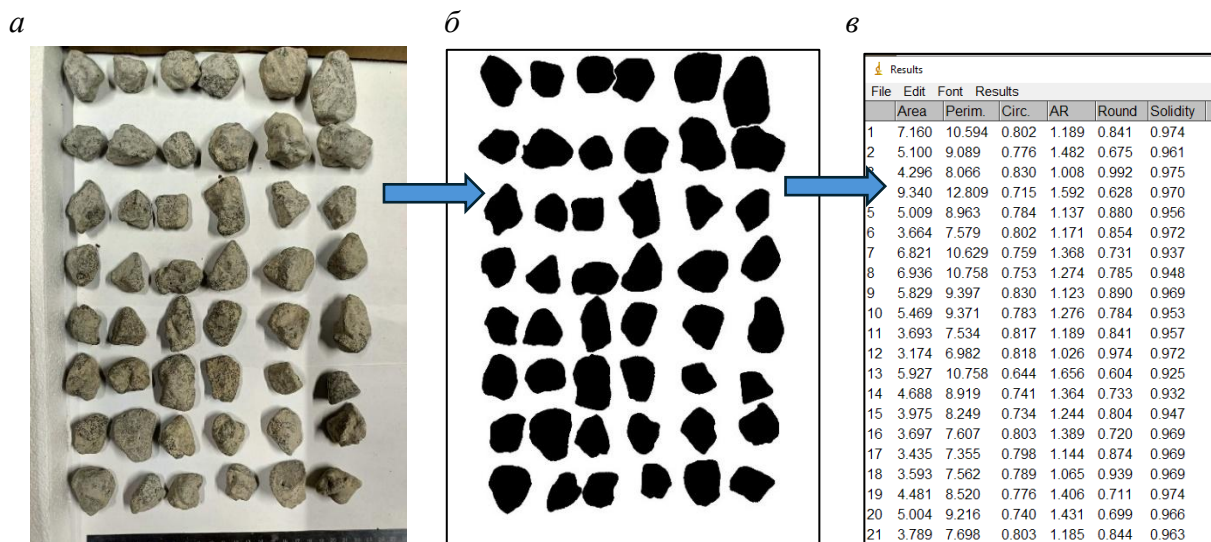


Рис. 3. Обробка зображень програмою ImageJ:

a – перший етап (отримання фотографії заповнювачів); *б* – другий етап (обробка фотографії програмою); *в* – третій етап (розрахунок параметрів)

На третьому етапі отримують результати розрахунків як таблицю, де в першому стовпчику наведено номер частинки, у другому і третьому – її площу і периметр, четвертому – округлість частинки, розраховану за формулою (1). У такий спосіб було оброблено фотографії природних заповнювачів. Результати свідчать, що середнє значення показника округлості вторинних заповнювачів становить 0,78, у той час як для натурального заповнювача цей показник дорівнює 0,73, що означає менший ступінь окатаності зерен. Слід зазначити, що різниця показників становить 5 %, а згідно зі стандартним методом відсоток зерен пластинчастої та голчастої форм (показник, протилежний округлості) відрізняється на

2,1 %. Оскільки для ідеально квадратного перерізу показник округлості дорівнює 0,78, отже, попередньо можна визначити це число як межу значення округлості, яке означає перехід від покращеної групи за формою зерен до кубоподібної.

Отримані дані також дають змогу розрахувати еквівалентний діаметр частинок за величиною їхньої площі (стовпчик 2 таблиці на рис. 3) і побудувати діаграму розподілу частинок за розмірами. Ці результати наведені на рис. 4. Як бачимо, середній розмір переважальної фракції природного щебеню становить 25,6 мм, а рециркульованого – 22,6 мм. Ці величини значно відрізняються від визначених за середнім розміром сит для розсіювання 15 і 30 мм (рис. 1).

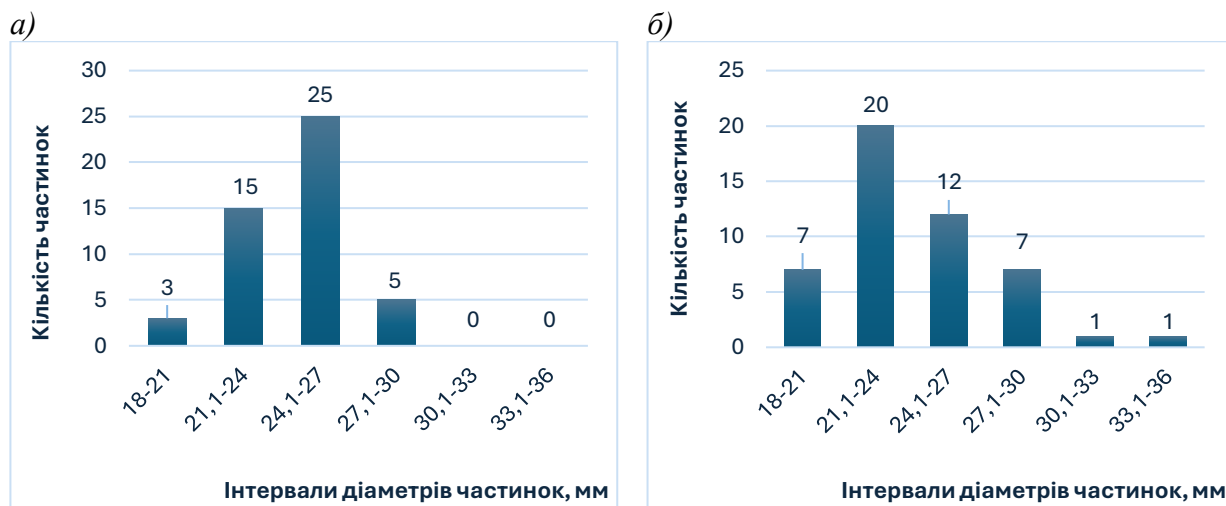


Рис. 4. Діаграми розподілу частинок за розмірами природного (а) і рециклінгового (б) щебеню

Відмінність у цих величинах призведе до помилкового розрахунку складів бетону, а саме визначення об'єму цементно-піщаного розчину, який має заповнити міжзерновий простір між частинками щебеню. Якщо справжній розмір частинок буде більше прийнятого за результатом розсіву, то міжзерновий простір буде менше, що призведе до більшого, ніж потрібно, об'єму цементно-піщаного

розчину і, як наслідок, перевитрат цементу. У протилежному випадку менший, ніж вважають, розмір частинок щебеню призведе до збільшення міжзернового простору, який не буде повністю заповнений розрахованою кількістю цементно-піщаного розчину, що викличе збільшення пористості, а отже зменшення міцності і довговічності бетону.

Висновки. У результаті оцінювання якості заповнювачів, отриманих від подрібнених залізобетонних шпал, встановлено таке. Переважальна фракція крупного заповнювача за результатами розсіву на ситах є фракцією з середнім розміром частинок 30 мм, у той час як більш точний метод обробки зображень дає величину середнього розміру 22,6 мм. Така розбіжність призведе до помилок у розрахунках складів бетону і перевитрат цементу або отримання бетону меншої міцності. За вмістом зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми, визначеним стандартним методом протягом кількогодинних вимірювань, вторинний щебінь належить до кубоподібної групи

заповнювачів для бетону. Оцінювання методом обробки зображень протягом кількох хвилин дає величину округлості 0,78, що характеризує більший ступінь окатаності зерен після механічної обробки. Найбільший відсоток видалення старого цементно-піщаного розчину відбувається за перші 1-1,5 год, що буде покладено в основу розроблення технології використання заповнювачів від залишків бетону. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення якості піску запропонованими методами для розроблення експрес-методів оцінювання якості крупного і дрібного заповнювачів, які дають змогу визначать їхні властивості безпосередньо на будівельних майданчиках.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.27-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 35 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держбуд України, 1999. 14 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-29-95 Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 35 с.
4. ДСТУ Б В.2.7-74-98 Будівельні матеріали. Крупні заповнювачі природні, з відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ: Держбуд України, 1999. 16 с.
5. ДСТУ Б В.2.7-71-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. Київ: Держбуд України, 1999. 47 с.
6. Savva P., Ioannou S., Oikonomopoulou K., Nicolaidis D., Petrou M.F. A Mechanical Treatment Method for Recycled Aggregates and Its Effect on Recycled Aggregate-Based Concrete. *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1-18. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14092186>.
7. Ren Q., Tao Y., Jiao D., De Schutter G., Jiang Z. Rheological properties of concrete with manufactured sand: A multi-level prediction. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. P. 104647. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104647>.
8. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 86 с.
9. Bhasya V., Bharatkumar B. H. Mechanical and Durability Properties of Concrete Produced with Treated Recycled Concrete Aggregate. *Materials Journal*. 2018. Vol. 115. Is. 2. P. 209-217. URL: <https://doi.org/10.14359/51701239>.

10. Wang B., Yan L., Fu Q., Kasal B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation & Recycling*. 2021. Vol. 171.105565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>.

11. Liu K., Xu W., Sun D., Tang J., Wang A., Chen D. Carbonation of recycled aggregate and its effect on properties of recycled aggregate concrete: A review. *Material Express*. 2021. Vol. 11. P. 1439–1452. URL: <https://doi.org/10.1166/mex.2021.2045>.

12. Спосіб виготовлення заповнювачів для бетону із відходів залізобетонних шпал: пат. на корисну модель UA 156792. № u202305944; заявл. 08.12.2023; опубл. 07.08.2024; Бюл. № 32. 7 с.

Зінченко Олексій Сергійович, здобувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com.
ORCID 0009-0000-3858-8258.

Zinchenko Oleksii, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com.
ORCID 0009-0000-3858-8258.

Статтю прийнято 01.11.2024 р.