

## ВЛАСТИВОСТІ ВТОРИННИХ КРУПНИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ, ОТРИМАНИХ В РЕЗУЛЬТАТІ ПОДРІБНЕННЯ БЕТОННИХ ВІДХОДІВ

Микола САВИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, Антон СМІРНОВ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Український державний університет науки і технологій  
2, вул. Лазаряна, Дніпро, Україна, 49010

<sup>1</sup> ms@pdaba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0003-4515-2457>

<sup>2</sup> smyrnov.anton@pdaba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2500-2323>

**Анотація.** За даними Київської школи економіки станом на січень 2024 року збитки від руйнувань і пошкоджень будівель і споруд внаслідок військових дій в Україні становлять щонайменше 75 мільярдів доларів. Тепер підрядні організації, які здійснюють ліквідацію наслідків збройної агресії, зобов'язані вжити заходів щодо повторного використання будівельного сміття. Враховуючи наявність природного щебеню в бетонному брухті, постає питання про можливість використання такого брухту після подрібнення та сортування в якості вторинного крупного заповнювача для бетону. При проектуванні бетонної суміші необхідно знати такі характеристики заповнювачів, як гранулометричний склад, насипна густина, середня густина зерен, порожнистість, міцність.

З метою визначення характеристик вторинного крупного заповнювача, отриманого з подрібненого бетону на місцевих матеріалах розроблено три суміші бетону та виготовлено з них серії зразків-кубів. У відповідному віці зразки вихідного бетону подрібнювалися за допомогою лабораторної щоклової дробарки.

Результати ситового аналізу показали, що несортовані суміші дрібної та крупної фракцій не відповідають вимогам національних стандартів через великий вміст крупних фракцій. При цьому в цілому гранулометричний склад лише крупних фракцій відповідає вимогам стандартів в Україні. Отримані насипна густина та середня густина зерен відрізняються в різних фракціях з великою дисперсією навіть в межах однієї фракції. Зі зменшенням розмірів зерен міцність заповнювача знижується. Таким чином, основним чинником, який має вирішальний вплив на властивості вторинних заповнювачів та бетону з такими заповнювачами, є наявність залишкового



**Микола САВИЦЬКИЙ**  
професор кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,  
д.т.н., професор



**Антон СМІРНОВ**  
аспірант кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій

розчину. Чим менша фракція щебеню, тим вищий вміст залишкового розчину, аж до окремих зерен, які повністю складаються з нього. Тому одним із методів поліпшення властивостей ВКЗ є зниження вмісту залишкового розчину.

**Ключові слова.** Вторинний крупний заповнювач; рециклінг; залишковий розчин; зерновий склад; насипна густина; середня густина; дробильність.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Згідно з розрахунками Київської школи економіки [1] станом на січень 2024 р. прямі втрати України від руйнувань та пошкоджень будівель і споруд в результаті бойових дій становлять не менше 75 млрд. доларів США. Відповідно під час післявоєнної відбудови велика кількість пошкоджених та зруйнованих об'єктів підлягатиме частковому демонтажу та знесенню.

В результаті цього країна зіткнеться з проблемою утворення мільйонів тон будівельних відходів. Враховуючи значний рівень наповненості існуючих полігонів задля запобігання екологічного лиха доцільним є повторне застосування матеріалів з відходів, утворених після демонтажу.

На сьогодні в Україні вже введені в дію нормативні вимоги, які регламентують повторне застосування будівельних відходів, в тому числі в якості сировини для виробництва будівельних матеріалів [2, 3].

За даними, наведеними в [4, 5], щорічно в Києві на полігони вивозиться близько 300 тис.т. тільки бетонного та залізобетонного брухту, вміст якого в загальному обсязі будівельних відходів складає більше 50%.

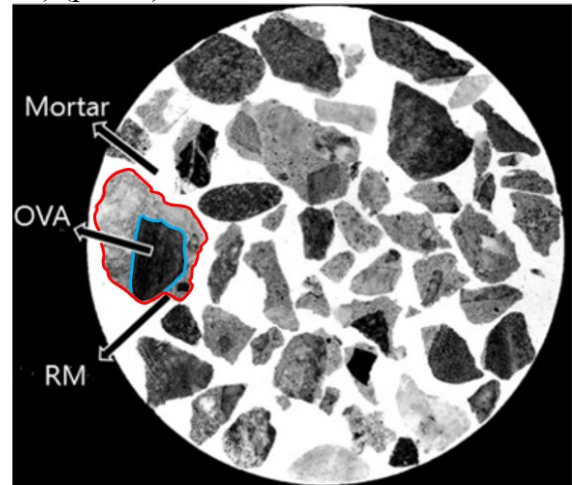
Незважаючи на високу енергоємність виробництва, бетон залишається найпоширенішим будівельним матеріалом. Враховуючи наявність в бетонному брухті, утвореному після демонтажу будівель і споруд, натурального щебеню, постає питання можливості застосування подрібненого бетону і під час нового будівництва. Найбільш очевидним є варіант використання подрібнених бетонних відходів в якості крупного заповнювача для виробництва нових бетонів.

Під час проектування складу бетонної суміші необхідно враховувати такі параметри крупних заповнювачів, як зерновий склад, насипна густина, середня густина зерен, порожнистість, міцність. Зазначені властивості визначають масовий вміст компонентів бетонної суміші, а також впливають на її характеристики (водо-цементне співвідношення (В/Ц), рухливість, густину тощо) [6]. Відсутність нормативно-технічної бази в області випробувань та застосування щебеню, отриманого в результаті подрібнення бетонних відходів, а також необхідність врахування його особливостей під час розрахунку складу бетону обумовлюють актуальність дослідження.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Щебінь, отриманий в результаті подрібнення бетонного брухту (рециклінговий ще-

бінь) у випадку застосування його для виготовлення бетону є вторинним крупним заповнювачем (ВКЗ). ВКЗ являє собою двофазну систему, яка складається з натурального заповнювача (щебеню або гравія) та залишкового розчину, приклеєного до крупного заповнювача [7]. Таким чином, в бетоні з використанням рециклінгового щебеню з'являються дві додаткові фази (залишковий розчин та міжфазна транзитна зона (МТЗ) між ним і натуральним заповнювачем) та одна видозмінена (МТЗ між новим розчином та ВКЗ) (рис. 1).



**Рис.1.** Зображення зразка бетону з ВКЗ [8]: *OVA* – натуральний заповнювач; *RM* – залишковий розчин; *Mortar* – новий розчин; *червона лінія* – МТЗ між ВКЗ та новим розчином; *синя лінія* – МТЗ між натуральним заповнювачем та залишковим розчином.

**Fig.1.** The view of concrete sample on recycled coarse aggregate (RCA) [5]: *OVA* – original virgin aggregate; *RM* – residual mortar; *red line* – interfacial transit zone (ITZ) between RCA and mortar; *blue line* – ITZ between OVA and RM.

Як відомо, механічні властивості бетону, як неоднорідного матеріалу, визначаються взаємодією його складових. А отже, властивості компонентів бетонної суміші мають безпосередній вплив на характеристики затверділого бетону. Наявність додаткових фаз в крупному заповнювачі збільшують неоднорідність бетонної суміші і, як наслідок, зменшують прогнозованість характеристик готового бетону [9].

В дослідженнях [10, 11, 12] автори зазначають, що за умови використання якісного та добре відсортованого ВКЗ суттєві погіршення характеристик бетону відсутні. До цього ж висновку щодо позитивного впливу якісного сортування заповнювача приходять і Річардсон та ін. [13]. За результатами їх експерименту встановлено, що проста заміна природного заповнювача на ВКЗ без ретельного сортування та коректування на етапі розрахунку складу бетонної суміші призводить до неконтрольованого зменшення густини суміші, утворення пор та значного зменшення міцності затверділого бетону. Але критерії якісного сортування, необхідні співвідношення фракцій в зазначених роботах не наведені.

За результатами аналізу міцності в дослідженнях [14, 15, 16] встановлена залежність механічних характеристик бетону з переробленим заповнювачем від характеристик бетону, який піддавався подрібненню для отримання вторинного заповнювача. Зазначається, що на властивості бетону з ВКЗ мають вплив В/Ц, міцність та тип заповнювачів бетону-джерела.

Для врахування впливу менш жорсткого залишкового розчину на характеристики ВКЗ та бетону з ВКЗ в роботі [17] запропонований метод визначення вмісту залишкового розчину. Суть методу зводиться до відділення залишкового розчину від натурального щебеню шляхом комбінованої дії декількох циклів заморожування та відтанення зразків ВКЗ та просочування їх в розчині сульфату натрію. Ці ж автори запропонували й інший метод, заснований на комп'ютерній обробці та аналізі контрастних зображень спилів зразків бетону з ВКЗ на білому цементі з подальшою побудовою 3D-моделей [18]. Суттєвим недоліком зазначених методів є тривалий термін випробувань, причому в лабораторних умовах.

Для розрахунку складу важкого бетону найбільш поширеним в Україні є розрахунково-експериментальний метод, який покладений в основу національних стандартів [19] та [6]. Згідно з цим методом вміст запо-

внювачів в бетонній суміші залежить безпосередньо від їх фізичних характеристик, а їх вплив на міцність та легкоукладальність суміші виражений шляхом введення коефіцієнтів та поправок до них. В своїх роботах [20, 21] Дворкін Л. Й. та ін. наводять значення цих коефіцієнтів та поправок, а також деякі емпіричні вирази для їх визначення, що залежать від походження, крупності, чистоти та інших властивостей заповнювачів.

Отже, для оцінки можливості застосування ВКЗ в умовах його великої неоднорідності та коректного розрахунку складу бетону з ВКЗ важливо визначити фактичні характеристики крупного заповнювача.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є визначення характеристик щебеню, отриманого з подрібненого бетону на місцевих матеріалах.

Для визначення зернового складу, насипної густини, середньої густини зерен, порожнестості, міцності щебеню, отриманого з подрібненого бетону, розраховані три склади бетону-джерела та виготовлені з них серії зразків-кубів по 9 штук. Кожного складу виготовлено по 3 серії для випробування та подрібнення у віці 28, 90 та 180 діб. Для розрахунку складів бетонних сумішей використовувались наступні матеріали:

- портландцемент ПЦ II/Б-III-400 виробництва Heidelbergcement, м. Кривий Ріг: дійсна густина  $\rho_{\text{д}}=3,1 \text{ г/см}^3$ , насипна густина  $\rho_{\text{н.п.}}=1,2 \text{ г/см}^3$ , нормальна густина цементного тіста 26%;
- пісок: модуль крупності  $M_k=1,39$ , що відповідає групі дуже дрібних пісків, середня густина  $\rho_{\text{п}}=2,65 \text{ г/см}^3$ , насипна густина  $\rho_{\text{н.п.}}=1,61 \text{ г/см}^3$ ;
- щебінь гранітний: зерновий склад відповідає табл. 1 [22], середня густина  $\rho_{\text{щ}}=2,6 \text{ г/см}^3$ , насипна густина  $\rho_{\text{н.щ.}}=1,51 \text{ г/см}^3$ , марка за дробильністю 1200.

З урахуванням зазначеного вище після усіх коригувань отримані склади бетонної суміші (на 10 л), що наведені у табл. 1.

**Табл. 1.** Розрахунок складу бетону-джерела  
**Table 1.** Design of origin concrete mix proportion

Маркування складу	C1	C2	C3
Клас міцності	C16/20	C20/25	C25/30
Цемент, г	3430	4530	5370
Вода, г	2200	2470	2560
В/Ц	0,64	0,55	0,48
Пісок, г	4050	3730	3390
Щебінь, г	13430	12120	11520

Бетонна суміш виготовлялась вручну. Ущільнення суміші в формах здійснювалось на вібростолі. Після розпалублення зразки

**Табл. 2.** Результати випробувань бетону-джерела  
**Table 2.** Origin concrete test results

Номер складу	Вік випробування та подрібнення, діб	Середня густина, г/см <sup>3</sup>	Середня міцність, $f_{c.cube}$ , МПа	Коефіцієнт варіації, %	Міцність $f_{cm}$ , МПа
1	2	3	4	5	6
C1	28	2,33	22,1	5,8	20,7
C2	28	2,36	30,7	3,7	28,7
C3	28	2,28	26,2	5,0	24,4
C1	90	2,38	29,4	13,0	23,0
C2	90	2,31	30,6	5,0	28,6
C3	90	2,32	36,0	8,2	32,9
C1	180	2,36	29,5	2,1	27,5
C2	180	2,32	34,8	2,8	32,5
C3	180	2,34	36,6	8,0	33,6

Подрібнення зразків бетону-джерела виконувалось на лабораторній щоківій дробарці зі складним обертанням. Оскільки розмір вхідного отвору дробарки становить 70 мм, зразки, що не випробовувались на пресі, були попередньо розколоті на фрагменти з максимальним розміром 50-60 мм. Для подальших випробувань використовувались саме розколоті зразки, виходячи з міркування, що такий метод руйнування з точки зору впливу на структуру матеріалу найближчий до реальних методів демонтажу будівель і споруд (рис. 2). Після подрібнення кожна суміш окремо розфасована в мішки і позначена за наступною схемою: XX/YY/K, де XX – номер складу, з якого отримана суміш, YY – вік, в якому зразки бетону-джерела та подрібнені суміші випробовувались, K – показник, що вказує на зразки бетону-джерела, розколоті перед подрібненням на копрі.

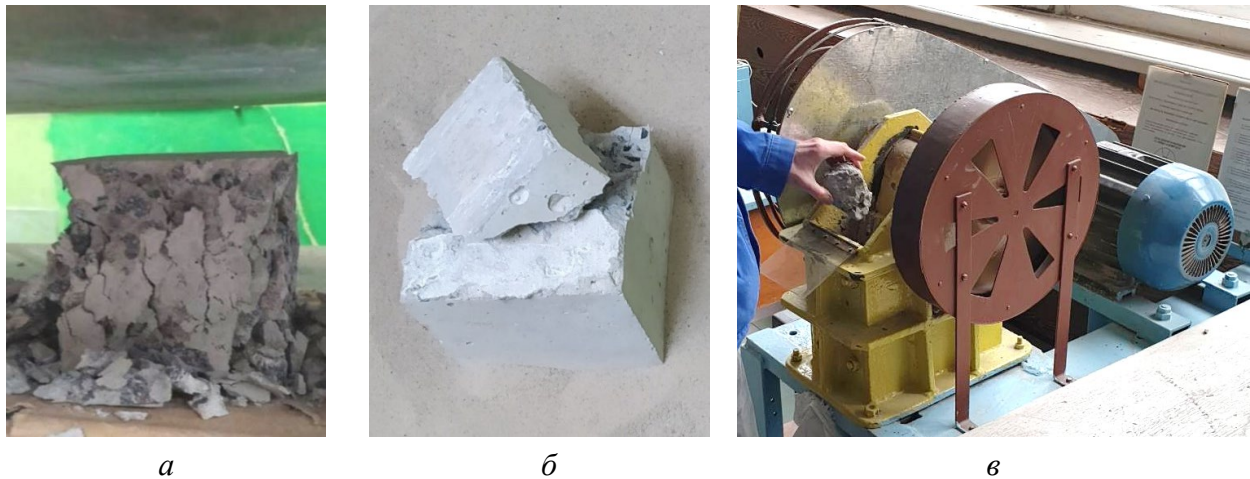
поміщались в сушильну шафу з нормальними умовами для тверднення протягом заданого періоду.

Для визначення міцності випадковим чином з кожного складу бетону-джерела відібрані по 3 зразки. Випробування зразків на міцність на стиск виконувалось на гідравлічному пресі П-125 згідно з [23]. Обробка результатів та визначення міцності виконувались у відповідності до [24]. Результати випробування наведені у табл. 2.

Зерновий склад отриманої після подрібнення суміші визначався згідно з п.4.3 [25]. Для розсіювання застосовувався стандартний набір сит з круглими та квадратними отворами.

За результатами визначення зернового складу побудовані криві розсіювання суміші дрібних (до 5 мм) та крупних фракцій (більше 5 мм) для кожної суміші, отриманої після подрібнення (рис. 3). Як видно з графіка нефракціоновані суміші дрібних та крупних фракцій не відповідають вимогам [6] (не знаходяться між кривими А та В) через великий вміст крупної фракції.

На рис. 4 показані криві розсіювання тільки крупних фракцій (більше 5 мм), нанесені на стандартний графік. З цього графіка можна зробити висновок про в цілому відповідність суміші лише крупних фракцій (тобто ВК3) вимогам будівельних стандартів в Україні.

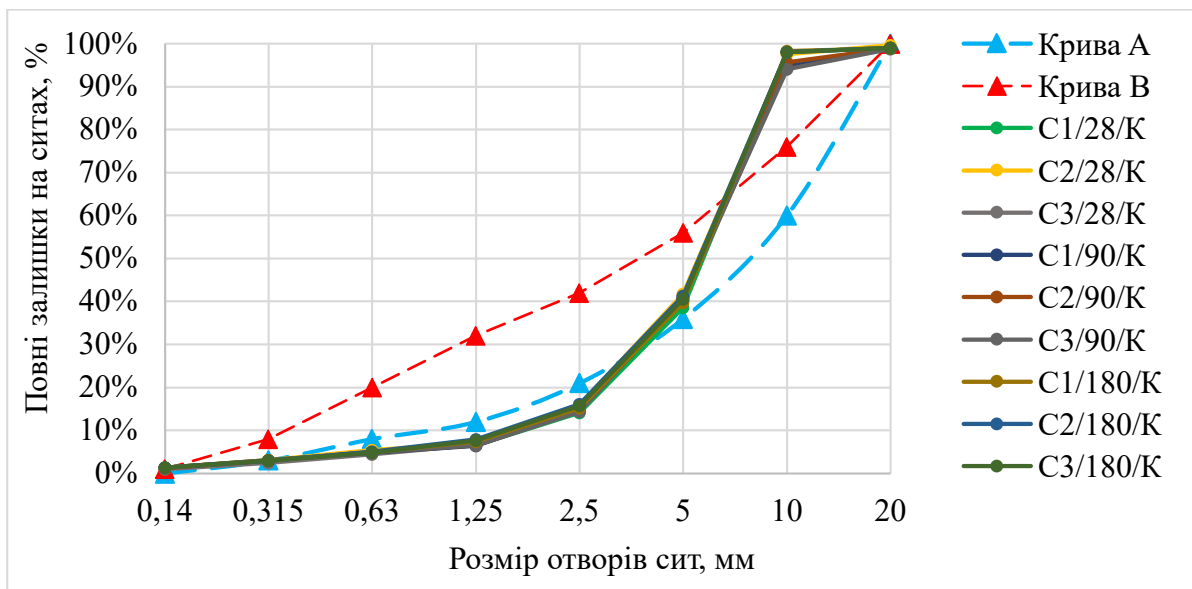


**Рис.2.** Підготовка зразків бетону-джерела до подрібнення:

- a* – випробуваний на пресі зразок бетону-джерела з порушеною структурою;  
*б* – розколотий на фрагменти зразок бетону-джерела без порушення структури;  
*в* – лабораторна щоква дробарка зі складним обертанням.

**Fig.2.** Preparation of origin concrete samples for grinding:

- a* – a sample of origin concrete with a broken structure tested on a press;  
*b* – a sample of origin concrete broken into fragments without disturbing the structure;  
*c* – laboratory jaw crusher with complex rotation



**Рис.3.** Криві розсіювання отриманих після подрібнення сумішей

**Fig.3.** Screening curves of the mixes obtained after grinding

Насипна густина  $\rho_n$ ,  $\text{г/см}^3$ , визначалася за методикою, наведеній в п. 4.17 [25]. Враховуючи обмежену кількість матеріалу для випробування фракції 5-10 мм застосовувався циліндр об'ємом 1 л, для фракції 10-20 мм – циліндр об'ємом 2 л. Для кожної фракції виконувалось 3 вимірювання.

Через наявність пористого залишкового розчину на зернах ВКЗ для визначення середньої густини  $\rho_k$ ,  $\text{г/см}^3$ , використовувався

метод, наведений у п. 4.16 [25]. Згідно з цим методом відібрані довільним чином і попередньо зважені проби з деякою кількістю зерен занурювались на 1-2 с у розплавлений парафін і після цього охолоджувались на повітрі. В подальшому зерна з парафіном зважувались і поміщались в колбу з попередньо визначеним об'ємом води в ній. Зміна об'єму води в колбі і є об'ємом зерен, покритих парафіном.

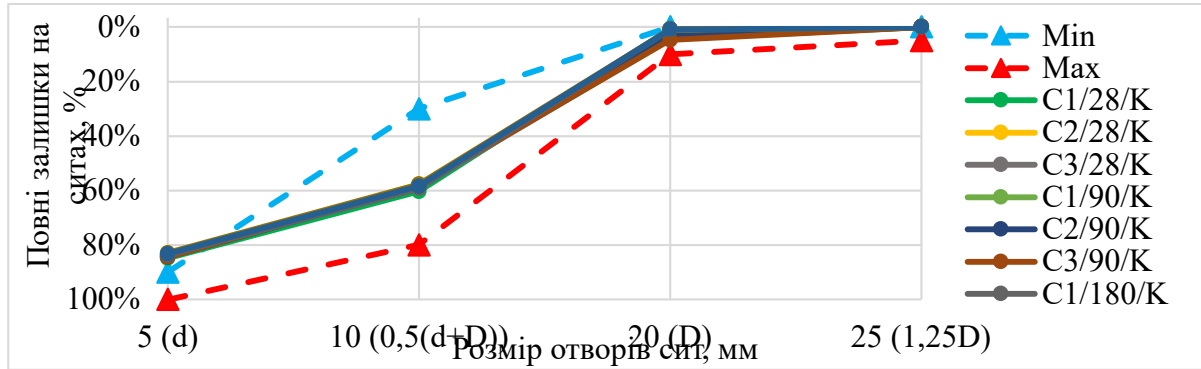


Рис.4. Криві розсіювання крупних фракцій на стандартному графіку

Fig.4. Standard Coarse Aggregate Screening Graph

За отриманими значеннями насипної та середньої густин визначалась порожнистість:

$$V_n = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_k}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Міцність крупного заповнювача за дробильністю визначалась у відповідності до п. 4.8 [25] у сталевому циліндрі з внутрішнім

діаметром 75 мм на пресі гідравлічному ПСУ-10.

Кожна фракція випробовувалась окремо. Результати визначення насипної густини, середньої густини зерен, порожнистість, міцності за дробильністю для кожної фракції наведені в табл. 3, 4.

Табл. 3. Результати випробувань фракцій 5-10 мм

Table 3. Test results of fraction 5-10 mm

Суміш	Вміст фракції, %	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>	Середня густина зерен, г/см <sup>3</sup>	Порожнистість, %	Дробильність, %
C1/28/K	28,8	1,07	2,37	54,85	18,6
C2/28/K	31,0	1,06	2,29	53,71	19,3
C3/28/K	29,8	1,06	2,35	54,89	17,2
C1/90/K	31,2	1,07	2,38	55,04	17,2
C2/90/K	30,8	1,07	2,32	53,88	21,0
C3/90/K	31,0	1,07	2,33	54,08	20,2
C1/180/K	29,2	1,10	2,36	53,39	19,8
C2/180/K	30,4	1,07	2,29	53,28	18,1
C3/180/K	29,8	1,05	2,34	55,13	15,6

Табл. 4. Результати випробувань фракцій 10-20 мм

Table 4. Test results of fraction 10-20 mm

Суміш	Вміст фракції, %	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>	Середня густина зерен, г/см <sup>3</sup>	Порожнистість, %	Дробильність, %
1	2	3	4	5	6
C1/28/K	70,1	1,24	2,52	50,79	11,6
C2/28/K	66,5	1,21	2,44	50,41	14,1
C3/28/K	64,9	1,24	2,48	50,00	13,0
C1/90/K	64,1	1,27	2,53	49,80	14,5
C2/90/K	65,4	1,21	2,49	51,41	17,4
C3/90/K	63,3	1,22	2,46	50,41	15,7
C1/180/K	70,0	1,25	2,55	50,98	14,9

Продовження табл. 4  
Continuation of Table 4

1	2	3	4	5	6
C2/180/К	68,5	1,20	2,45	51,02	15,6
C3/180/К	69,1	1,20	2,51	52,19	14,2

Отримані насипні та середні густини зерен різних фракцій суттєво відрізняються, що очевидно пояснюється різним вмістом залишкового розчину – чим менший розмір зерен, тим більший вміст більш легкого залишкового розчину в зернах цієї фракції, тим менші насипна та середня густини

Враховуючи, що міцність заповнювача є характеристикою матеріалу (гірської породи), за результатами випробувань ВКЗ побудований графік залежності дробильності щебеню від середньої густини зерен (рис. 5). З графіка видно, що міцність ВКЗ збільшується разом зі збільшенням густини зерен (крупності фракції).

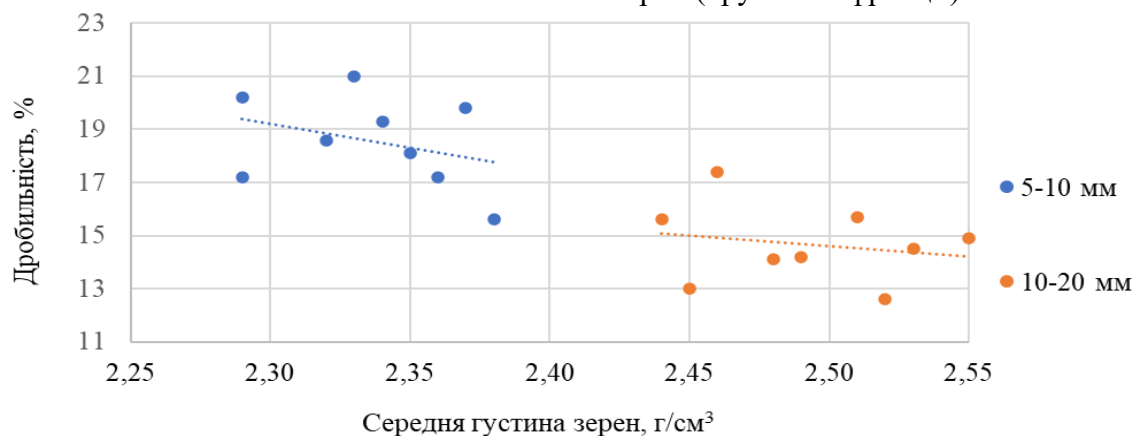


Рис.5. Графік залежності між дробильністю та середньою густиною зерен  
Fig.5. Graph of dependence of aggregate crushing value on specific density

### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

За результатами дослідження не встановлені кореляції між складом, віком та міцністю бетону-джерела та щебеню, отриманого після його подрібнення.

Головним чинником, що має визначальний вплив на властивості вторинних заповнювачів та бетонів з їх використанням, є наявність залишкового розчину на зернах щебеню. При чому його вміст на кожному окремому зерні не є постійним навіть в межах однієї фракції, що призводить до значної дисперсії величин середньої густини зерен. За результатами дослідження встановлений факт зменшення середньої та насипної густини, а також міцності заповнювача зі зменшенням крупності фракції.

Зерновий склад тільки крупної фракції, отриманої після подрібнення бетонних від-

ходів, в цілому відповідає вимогам нормативної документації. Але зважаючи на зменшення густини та міцності заповнювача разом із зменшенням розмірів зерен, під час виготовлення бетонної суміші для утворення суміші заповнювачів доцільним виглядає ручне дозування (в лабораторних умовах) або використання дозаторів (на виробництві) за умови забезпечення вмісту менших фракцій на рівні, що дозволить отримати максимальні насипну густину та щільність пакування зерен (наприклад, згідно з [6] у двофракційній суміші заповнювача допускається вміст меншої фракції на рівні 20-25%). В цьому контексті необхідно звернути увагу на досить високу, порівняно з натуральним щебенем, порожнистість. Об'єм порожнин між зернами очевидно пов'язаний з підвищеною лещадністю зерен через особливості процесу подрібнення в шоківій дробарці.

Крім того, візуально виявлені зерна з увігнутою формою, які сприяють зниженню щільності пакування.

Також під час подрібнення в шоковій дробарці під впливом стискаючих зусиль відбувається порушення структури матриці розчину. В результаті деякі зерна при збереженні форми стають дуже слабкими – їх руйнування можливе навіть руками. Під час дослідження була утворена пробна суміш ВКЗ шляхом змішування окремих фракцій в планетарному міксері. Після просіювання отриманої суміші щебеню частка зерен, що пройшла крізь сито з отворами 5 мм, становила більше 5%. При цьому до змішування частка таких зерен в кожній фракції не перевищувала 1% за масою. З огляду на це доцільно здійснювати додаткове просіювання готової суміші ВКЗ, що утворена шляхом дозування окремих фракцій, з подальшим видаленням дрібної фракції, або застосовувати поправку, що враховує підвищену водопотребу заповнювача.

Отже, одним з методів поліпшення властивостей бетонних сумішей з ВКЗ є зменшення вмісту залишкового розчину. В подальшому необхідні дослідження впливу методів та кількості стадій подрібнення брухту на якісні характеристики вторинного щебеню, а також розробка методів врахування особливостей переробленого крупного заповнювача під час проектування складів бетонних сумішей.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року.** – К: КШЕ, 2024. – 38 с.
2. **Порядок виконання робіт з демонтажу об'єктів, пошкоджених або зруйнованих внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів:** *Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 №474.*
3. **Порядок поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведення робіт з ліквідації їх наслідків:** *Постанова Кабінету Міністрів України від 27.09.2022 №1073.*
4. **Морковська Н. Г., Абделрахем А.** Переробка будівельних відходів, що утворюються в Україні. // *Комунальне господарство міст.* – 2019. – Т. 1 – № 147. – С. 210–214.
5. **Попович О. Р., Захарко Я. М., Мальований М.** Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів. // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка".* – 2013. – № 755. – С. 321–324.
6. **ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013.** Настанова щодо визначення складу важкого бетону. – К.: *Мінрегіон України*, 2014. – 87 с.
7. **Савицький М. В., Смирнов А. С.** Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. // *Український журнал будівництва та архітектури.* – Д.: ПДАБА, 2023 – № 6 (018) – С. 111-117.
8. **Yang S., Lee H.** *Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications.* *Constr. Build. Mater.*, 136 (2017), pp. 9-17.
9. **Smyrnov A.S., Savytskyi M. V., Myslytska A. O.** Properties of Recycled Coarse Aggregates Made of Concrete Waste. // *Матеріали науково-практичної конференції «Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України».* м. Дніпро, 13.03.2024 р. – с. 12-15.
10. **Buttler A. M., Machado E. F.** Properties of Concrete with Recycled Concrete Coarse Aggregates. *ACI Spec. Publ.*, vol. 229, pp. 497–510, 2005.
11. **De Brito J., Silva R. V.** Current Status on the Use of Recycled Aggregates in Concrete: Where Do We Go From Here? *RILEM Tech. Lett.*, pp. 1–5, 2016.
12. **Limbachiya M. C., Leelawat T., Dhir R. K.** Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. // *Materials and Structures.* – 2000. – Vol. 33, no. 9. – P. 574–580.
13. **Richardson A.E., Coventry K., Graham S.** Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey. University of Northumbria, Newcastle upon Tyne, UK*, 2009, vol. 27 (1). P.62-70.
14. **Yang K.-H., Chung H.-S., Ashour A. F.** Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. // *ACI Materials Journal.* – 2008. – Vol. 105(3). – P. 289-296.
15. **Ulloa V. A., García-taengua E., Pelufo M., Domingo A., Serna P.** New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. // *ACI Materials Journal.* – 2013. – Vol. 110, no. 6. – pp. 687–696.



16. Salesa A., Perez-Benedicto J. A., Colorado-Aranguren D., Esteban L. M., Sanz-baldúz L. J., Pedro L. L., Ramis J., Olivares D. Physico-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 141. – P. 248–255.
17. Dean S. W., Abbas A., Fathifazl G., Burkan Isgor O., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S. Proposed Method for Determining the Residual Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates // *Journal of ASTM International*. 2008. – Vol. 5, no. 1. – P. 101087.
18. Abbas A., Fathifazl G., Burkan Isgor O., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S., Zavadil R. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis // *Materials Characterization*. – 2009. – Vol. 60, no. 7. – P. 716–728.
19. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. – К.: Мінрегіон України, 2010.
20. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетонів (методи, приклади, вправи): навч. посіб. – К.: Вид. дім "Кондор". – 2018. – 613 с.
21. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. Проектування складів бетону із заданими властивостями: навч. посіб. – Р.: РДТУ. – 2000. – 215 с.
22. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. – К.: Держбуд України, 1999.
23. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – К.: Мінрегіон України, 2010.
24. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності. – К.: Мінрегіон України, 2010.
25. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань (ГОСТ 8269.0-97). З Поправкою. – К.: Держбуд України, 1999. – 47 с.
- dii або терористичних актив: *Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 19.04.2022 №474*.
3. **Poriodok povodzhennia z vidkhodamy, shcho utvorylys u zviazku z poshkodzhenniam (ruinuvanniam) budivel ta sporud vnaslidok boiovykh dii, terorystychnykh aktiv, dyversii abo provedenniam robit z likvidatsii yikh naslidkiv:** *Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27.09.2022 №1073*.
4. **Morkovska N. H., Abdelrakhem A.** Pererobka budivelnykh vidkhodiv, shcho utvoriuyutsia v Ukraini. // *Komunalne hospodarstvo mist.* – 2019. – T. 1 – № 147. – S. 210–214.
5. **Popovych O. R., Zakharko Ya. M., Malovanyi M.** Problemy utylizatsii ta pererobky budivelnykh vidkhodiv. // *Visnyk Natsional-noho universytetu "Lvivska politekhni-ka"*. – 2013. – № 755. – S. 321–324.
6. **DSTU-N B V.2.7-299:2013.** Nastanova shchodo vyznachennia skladu vazhkoho betonu. – К.: *Minrehion Ukrainy*, 2014. – 87 s.
7. **Savytskyi M. V., Smyrnov A. S.** Osoblyvosti vykorystannia podribnenoho betonnoho brukhtu v yakosti krupnogo zapov-niuvacha dlia betonu. // *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*. – D.: PDABA, 2023 – № 6 (018) – S. 111-117.
8. **Yang S., Lee H.** Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications. *Constr. Build. Mater.*, 136 (2017), pp. 9-17.
9. **Smyrnov A.S., Savytskyi M. V., Myslytska A. O.** Properties of Recycled Coarse Aggregates Made of Concrete Waste. // *Materialy naukovo-praktychnoi konferentsii «Prosvannia enerhoefektyvnosti ta pidhotovka fakhivtsiv dlia vidbudovy Ukrainy»*. m. Dnipro, 13.03.2024 r. – s. 12-15.
10. **Buttler A. M., Machado E. F.** Properties of Concrete with Recycled Concrete Coarse Aggregates. *ACI Spec. Publ.*, vol. 229, pp. 497–510, 2005.
11. **De Brito J., Silva R. V.** Current Status on the Use of Recycled Aggregates in Concrete: Where Do We Go From Here? *RILEM Tech. Lett.*, pp. 1–5, 2016.
12. **Limbachiya M. C., Leelawat T., Dhir R. K.** Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. // *Materials and Structures*. – 2000. – Vol. 33, no. 9. – P. 574–580.
13. **Richardson A.E., Coventry K., Graham S.** Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey. University of Northumbria, Newcastle upon Tyne, UK, 2009, vol. 27 (1). P.62-70*.

## REFERENCES

1. **Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruinuvan vnaslidok viiskovoi ahresii Rosii proty Ukrainy stanom na pochatok 2024 roku.** – К: *KShE*, 2024. – 38 s.
2. **Poriodok vykonannia robit z demontazhu obektiv, poshkodzhennykh abo zruinovanykh vnaslidok nadzvychainykh sytuatsii, voiennykh**

14. Yang K.-H., Chung H.-S., Ashour A. F. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. // *ACI Materials Journal*. – 2008. – Vol. 105(3). – P. 289-296.
15. Ulloa V. A., García-taengua E., Pelufo M., Domingo A., Serna P. New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. // *ACI Materials Journal*. – 2013. – Vol. 110, no. 6. – pp. 687–696.
16. Salesa A., Perez-Benedicto J. A., Colorado-Aranguren D., Esteban L. M., Sanz-baldúz L. J., Pedro L. L., Ramis J., Olivares D. Physico-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 141. – P. 248–255.
17. Dean S. W., Abbas A., Fathifazl G., Burkan Isgor O., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S. Proposed Method for Determining the Residual Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates // *Journal of ASTM International*. 2008. – Vol. 5, no. 1. – P. 101087.
18. Abbas A., Fathifazl G., Burkan Isgor O., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S., Zavadil R. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis // *Materials Characterization*. – 2009. – Vol. 60, no. 7. – P. 716–728.
19. DSTU B V.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетон. Правильність складу. – К.: *Minrehion Ukrainy*, 2010.
20. Dvorkin L. Y. Проєктування складів бетону (методи, приклади, вправи): навч. посіб. – К.: *Від. дим "Кондор"*. – 2018. – 613 с.
21. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Harnitskyi Yu. V. Проєктування складів бетону із заданими властивостями: навч. посіб. – Р.: *RDTU*. – 2000. – 215 с.
22. DSTU B V.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Шехебін та хравій шхилні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкції та робіт. Технічні умови. – К.: *Derzhbud Ukrainy*, 1999.
23. DSTU B V.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетон. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – К.: *Minrehion Ukrainy*, 2010.
24. DSTU B V.2.7-224:2009. Бетон. Правильність контролю міцності. – К.: *Minrehion Ukrainy*, 2010.
25. DSTU B V.2.7-71-98. Шехебін і хравій із шхилних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт.

Методи фізико-механічних випробувань (HOST 8269.0-97). З Поправкою. – К.: *Derzhbud Ukrainy*, 1999. – 47 с.

## PROPERTIES OF RECYCLED COARSE AGGREGATES OBTAINED FROM CRUSHED CONCRETE WASTE

Mykola SAVYTSKYI,  
Anton SMYRNOV

**Summary.** According to the Kyiv School of Economics as of January 2024, the losses from the destruction and damage of buildings and structures as a result of military actions in Ukraine amount to at least 75 billion dollars. Now contractors carrying out the liquidation of the consequences of armed aggression are required to take measures to reuse construction waste. Taking into account the presence of natural crushed stone in concrete scrap, the question arises about the possibility of using crushed concrete in new construction. During the design a concrete mixture it is necessary to know such characteristics of aggregates as grain size composition, bulk density, specific density, voids, strength.

Three mixtures of concrete were designed and a series of cube samples were made from them to determine the specified characteristics of recycled coarse aggregate obtained from crushed concrete on local materials. At the appropriate age the samples of origin concrete were crushed using a laboratory jaw crusher.

The results of sieve analyses showed that ungraded mixtures of fine and coarse fractions do not meet the requirements of national standard due to the large content of coarse fractions. At the same time, in general, the granulometric composition of only coarse fractions meets the requirements of standards in Ukraine. The obtained bulk densities and specific densities differ in different fractions with a large dispersion even within the same fraction. The strength of the aggregate decreases with a decrease in grain sizes. Thus, the main factor that has a decisive influence on the properties of RCA and concrete with their use is the presence of residual mortar. The smaller the fraction of the RCA, the higher the residual mortar content, up to individual grains that are entirely composed of it. Therefore, one of the methods of improving the properties of RCA is to reduce the content of the residual mortar.

**Key words.** Recycled coarse aggregate; recycling; residual mortar; granulometric composition; bulk density; specific density; strength.

Стаття надійшла до редакції 5.05.2024 р.