

УДК 691.32

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОДРІБНЕНОГО БЕТОННОГО БРУХТУ ЯК КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА ДЛЯ БЕТОНУ

САВИЦЬКИЙ М. В.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
СМИРНОВ А. С.<sup>2\*</sup>, *асп.*

<sup>1</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-00, e-mail: [ms@pdaba.edu.ua](mailto:ms@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>2\*</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, +38 (056) 756-33-00, e-mail: [smyrnov.anton@pdaba.edu.ua](mailto:smyrnov.anton@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-2500-2323

**Анотація. Постановка проблеми.** Згідно з результатами дослідження Київської школи економіки станом на червень 2023 р. загальна сума прямих задокументованих збитків житловій та нежитловій інфраструктурі через руйнування та пошкодження в результаті воєнних дій склала понад \$150,5 млрд. Під час післявоєнної відбудови Україна зіткнеться з проблемою великої кількості будівель і споруд, що підлягатимуть частковому демонтажу та знесенню. Цей процес супроводжуватиметься утворенням значної кількості будівельних відходів, які традиційно в Україні вивозяться на полігони без переробки. З іншого боку виникне потреба у великій кількості будівельних матеріалів, частка яких у вартості будівництва може сягати 50 %. Для зниження собівартості об'єктів доцільним бачиться повторне застосування матеріалів із відходів, утворених після демонтажу. Такі матеріали називаються рециклінгові. Найбільш очевидний варіант використання подрібнених бетонних відходів як щебеню для виробництва нових бетонів. **Мета дослідження** – виявлення особливостей перероблених крупних заповнювачів із бетонних відходів та бетонів з їх використанням, визначення впливу бетону-джерела на властивості вторинних заповнювачів. **Висновки.** Розглянуто мезоскопічну модель бетону із вторинним крупним заповнювачем. Аналіз існуючих на сьогодні результатів досліджень як самих заповнювачів із бетонного брухту, так і бетонів з їх використанням, показав, що в цілому за умови правильних розрахунків складів бетонних сумішей, що враховують фактичні фізико-механічні властивості вторинних заповнювачів, можливе виготовлення конструкційних бетонів. При цьому вагомий вплив мають методи подрібнення та зерновий склад таких заповнювачів. Для стандартизації підходів до досліджень вторинних заповнювачів необхідне створення відповідної методики або нормативної бази.

**Ключові слова:** бетон; крупний заповнювач; будівельні відходи; рециклінг

## FEATURES OF USING CRUSHED CONCRETE AS A COARSE AGGREGATE FOR CONCRETE

SAVYTSKYI M.V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
SMYRNOV A.S.<sup>2\*</sup>, *Postgrad. Stud.*

<sup>1</sup> Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: [ms@pdaba.edu.ua](mailto:ms@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>2\*</sup> Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: [smyrnov.anton@pdaba.edu.ua](mailto:smyrnov.anton@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-2500-2323

**Abstract. Problem statement.** According to the results of a study by the Kyiv School of Economics as of June 2023 the total amount of direct documented damage to residential and non-residential infrastructure due to destruction and damage as a result of military actions exceeded \$150.5 billion. During the post-war reconstruction Ukraine will face the problem of a large number of buildings and structures that will be subject to partial dismantling and demolition. This process will be accompanied by the generation of a significant amount of construction waste, which traditionally in Ukraine is taken to landfills without recycling. On the other hand, there will be a need for a large quantity of construction materials, the share of which in the construction cost may reach 50 %. To reduce the cost of objects, it is advisable to reuse materials from waste generated after dismantling. Such materials are called recycling. The most obvious option is the use of crushed concrete waste as a coarse aggregate for the production of new concrete.

**The purpose of the article.** Identification of the features of recycled coarse aggregates from concrete waste and concrete with their use, determination of the influence of source concrete on the properties of recycled aggregates. **Conclusions.** The mesoscopic model of concrete with recycled coarse aggregate has been examined. The analysis of the current research results on both recycled concrete aggregates and concrete with their use showed that, in general, with correct calculations of concrete mix compositions that consider the actual physical and mechanical properties of recycled aggregates, the production of structural concrete is possible. At the same time, crushing methods and the grain composition of such aggregates have a significant influence. In order to standardize the approaches to the research of recycled aggregates, it is necessary to create an appropriate methodology or regulatory framework.

**Keywords:** concrete; coarse aggregate; construction waste; recycling

**Постановка проблеми.** Згідно з результатами дослідження Київської школи економіки [3] станом на червень 2023 р. загальна сума прямих задокументованих збитків житловій та нежитловій інфраструктурі в результаті воєнних дій склала понад \$150,5 млрд. У кількісному вимірі серед іншого це становить:

– близько 167,2 тис. будівель (147,8 тис. приватних, 19,1 тис. багатоквартирних, 0,35 тис. гуртожитків);

– 630 зруйнованих чи пошкоджених адміністративних будівель;

– 718 зруйнованих чи пошкоджених амбулаторій та лікарень (без урахування приватних закладів);

– щонайменше 997 зруйнованих та 2 380 пошкоджених об'єктів освітньої та наукової інфраструктури;

– пошкоджено або зруйновано щонайменше 348 релігійних об'єктів, 705 будинків культури, 82 музеї, 157 готелів та 8 спортивних стадіонів;

– суттєвих пошкоджень або руйнувань зазнали щонайменше 2,9 тис. торговельних точок, 27 торгових центрів;

– сумарна ємність зруйнованих та пошкоджених зерносховищ складає 11,4 млн т;

– зруйновані 344 мости і мостові переходи, 126 залізничних вокзалів і станцій, інфраструктура 19 аеродромів.

У квітні 2022 року на офіційній сторінці Міністерства розвитку громад та територій України у Facebook опубліковано пост про те, що Мінрегіон спільно з Міндовкіллям та Конфедерацією будівельників України розробляють механізми утилізації та повторного використання будівельних відходів, що утворились внаслідок масових

руйнувань інфраструктури, з метою недопущення екологічного лиха. Мова йде про мільйони тонн будівельного сміття.

Але проблема будівельних відходів для України існувала і до лютого 2022 року. Так, наприклад, після демонтажу 5-поверхової «хрущовки» на чотири під'їзди утворюється близько 4,5–5 тис. т відходів, з них 52 % бетон та залізобетон, 32 % – кам'яні стінові матеріали [4]. За даними, наведеними в [1], щорічно в Києві на полігони вивозиться близько 300 тис. т тільки бетонних та залізобетонних відходів. За даними вивчення результатів 127 державних закупівель на електронному майданчику Prozorro, протягом 2017–2021 рр. лише Департаментами інфраструктури та благоустрою та капітального будівництва м. Дніпра укладені договори на вивезення близько 120 тис. т будівельних відходів на загальну суму 8,5 млн грн.

При цьому угодами між замовниками та надавачами послуг не передбачені роботи із сортування та переробки відходів, а лише вивезення та захоронення на полігонах. Також актуальним постає питання загального рівня фізичного зносу будівель і споруд у промисловому і в житлово-цивільному секторах.

Розвиток будівництва сприяє зростанню об'ємів знесення старих будівель і споруд, що, у свою чергу, спричиняє появу великої кількості будівельних відходів. За даними «Протоколу ЄС з поводження з відходами будівництва та знесення будівель» [8], будівельні відходи складають третину всіх відходів. Щорічно у світі утворюється близько 7 млрд т відходів будівництва та знесення, з них майже 2,8 млрд т є біонерозкладні (бетон, цегла, скло, сталь

тощо). І лише 419 млн т будівельного сміття після відповідної переробки повторно застосовуються у будівельному виробництві.



Рис. 1. Суттєво пошкоджений внаслідок ракетного обстрілу приватний будинок в м. Дніпро



Рис. 2. Демонтовані конструкції пального фундаменту в місці нової забудови, м. Дніпро

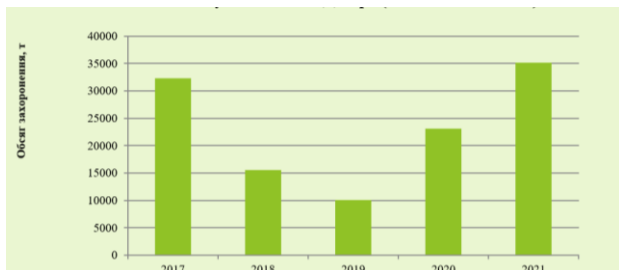


Рис. 3. Обсяги захоронення будівельних відходів згідно з угодами, укладеними Департаментами благоустрою та капітального будівництва Дніпровської міської ради

У 2017 році КМУ схвалив Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 року. На третьому етапі її реалізації (2024–2030 рр.) передбачається здійснення заходів щодо модернізації матеріально-технічної бази суб'єктів господарювання з перероблення та утилізації відходів. Спеціальними заходами у сфері будівельно-ремонтних відходів стали прийняття нормативно-правових актів для стимулювання перероблення відходів, створення ефективної інфраструктури поводження з будівельними відходами

шляхом забезпечення функціонування стаціонарних та мобільних потужностей для переробки відходів, включення планів управління відходами до проектно-кошторисної документації. Таким чином, застосування матеріалів із утилізованих будівельних відходів дозволить вирішити нагальні та майбутні економічні, юридичні та екологічні проблеми під час будівництва.

**Аналіз публікацій.** В даній роботі розглядалися бетони з використанням крупних заповнювачів із подрібненого бетону (вторинні крупні заповнювачі, перероблені заповнювачі).

Для оцінки властивостей бетонних сумішей та затверділого бетону з використанням вторинних заповнювачів проведено численні дослідження [10; 13; 14]. У вказаних роботах досліджувались як властивості матеріалу, так і поведінка різних видів конструкцій з бетону на вторинних заповнювачах за дії навантажень. Дослідники експериментували з часткою переробленого крупного заповнювача, якою заміщувався натуральний заповнювач, використовували різні кількості та типи пластифікаторів та пуцоланових добавок, частину цементу заміщували летючою золою, що також є поширеним відходом, але у сфері виробництва електроенергії.

Батлер і Машаду у 2005 р. [5] та де Бріто і Сілва у 2016 р. [6] дійшли висновків, що за умови використання якісного та добре відсортованого переробленого заповнювача в бетонах нормальної міцності (з водоцементним співвідношенням від 0,45 до 0,5 та  $f_c \approx 31$  МПа) суттєві погіршення характеристик бетону не спостерігаються. До цього ж висновку щодо позитивного впливу якісного фракціонування та сортування заповнювача приходять і Річардсон та ін. [16]. У їх дослідженні у 2009 р. зменшення міцності бетону з невідсортованим вторинним заповнювачем сягає 53 % порівняно з традиційним бетоном.

За результатами аналізу міцності в інших дослідженнях [17; 18] встановлено залежність механічних характеристик бетону з переробленим заповнювачем від

характеристик бетону, який піддавався подрібненню для отримання такого заповнювача.

**Мета статті** – виявлення особливостей вторинних заповнювачів та бетонів з їх використанням, визначення впливу бетону-джерела на властивості вторинних заповнювачів.

**Виклад матеріалу.** Перші дослідження щодо застосування заповнювачів з бетонного брухту для виготовлення бетону в Європі були проведені ще у 1977 р. в Нідерландах. У наступному десятилітті їх перші результати вже були застосовані у пілотних проектах. Частина стін нового шлюзу Берендрехт у Бельгії була виконана з бетону, в якому як крупний заповнювач використаний подрібнений бетон стін старого шлюзу (1988 р.). Під час випробувань була досягнута міцність на стиск  $40 \text{ Н/мм}^2$ . Важливо зазначити, що походження і якість вторинного заповнювача були добре відомі. Також позитивні результати показали використання вторинного щебеню у внутрішніх стінових панелях декількох будинків в м. Амерсфорт, Нідерланди, 1986 р. [7].

У подальшому рецикльований бетон регулярно застосовувався в конструкціях тротуарів, велосипедних доріжок та шосейних доріг Європи та США.

Після перших успіхів у застосуванні переробленого бетону як крупного заповнювача з'явилась потреба у розробленні стандартів та специфікацій, які б урегулювали можливість його використання. Перші спроби розробити спеціальні рекомендації щодо застосування перероблених заповнювачів були здійснені у Данії та Нідерландах в кінці 80-х років минулого століття.

Наразі у країнах ЄС, Британії, США та Японії визначені сфери застосування переробленого крупного заповнювача: крупний заповнювач у бетонах 5–20 МПа для виробництва бетонних і залізобетонних виробів та крупний заповнювач у бетонах міцністю до 30 МПа при змішуванні з природним щебенем.

Заповнювачі з подрібненого бетону вже зараз включені у специфікації та стандарти на заповнювачі в США, Японії та Нідерландах.

За даними низки американських фірм, при одержанні щебеню з бетону витрата палива у 8 разів менше, ніж при його видобутку в природних умовах, а собівартість бетону на вторинному щебені може бути нижчою на величину до 25 %.

Що ж собою являє крупний заповнювач із бетонного брухту? Бетон – це неоднорідний композитний матеріал, механічні властивості якого визначаються взаємодією його складових. Заповнювачі займають 60–75 % загального об'єму бетону і значна частина цього об'єму – це крупний заповнювач.

У мезоскопічній моделі бетон із натуральним заповнювачем представлений у вигляді двофазної системи, що складається з крупного заповнювача та матриці розчину, які зв'язані шаром міжфазної перехідної зони по межі крупного заповнювача.

Вторинний крупний заповнювач отримується шляхом подрібнення та переробки використаного бетону. Таким чином, перероблений заповнювач складається з двох головних фаз – натурального заповнювача (original virgin aggregate) та залишкового розчину (residual mortar або adhered mortar). А отже, бетон із вторинним заповнювачем являє собою більш складну систему через наявність додаткових фаз – залишкового розчину та граничної зони між ним і натуральним заповнювачем.

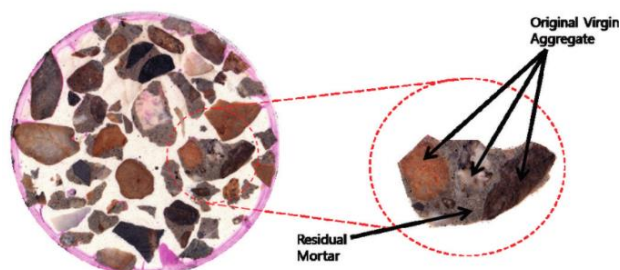


Рис. 4. Мезоскопічна модель бетону з вторинним крупним заповнювачем

Очевидно, що наявність більш пористої складової в крупному заповнювачі –

залишкового розчину – сприяє збільшенню абсорбційної властивості заповнювача, що, у свою чергу, вимагає збільшення водо-цементного співвідношення в бетоні з таким заповнювачем або використання добавок.

Виявлено, що в довготривалому вимірі пористість переробленого заповнювача знижується швидше, ніж у натурального. В період від 28 днів до 5 років можливе зниження пористості на 45 %, тоді як для бетону з натуральним заповнювачем величина зменшення складає близько 7 %. Це пов'язано з ефектом самоцементування старого розчину та його взаємодією з новою цементною пастою [11].

На міцність бетону з вторинним крупним заповнювачем впливає як його вміст, так і міцність бетону бруксту. За рахунок наявності залишкового розчину жорсткість вторинного заповнювача стає нижчою за натуральний заповнювач.

За однакового водо-цементного співвідношення бетони на вторинних заповнювачах мають нижчий модуль пружності порівняно з відповідними бетонами на натуральних заповнювачах (в середньому на 16 %). У [12] для бетонів з умістом переробленого крупного заповнювача 100 % в діапазоні міцностей 37–60 МПа запропоновано вважати значення модуля пружності 80 %, для діапазону міцностей 20–30 МПа – 95 % від аналогічного бетону на натуральному заповнювачі.

За умови правильного розрахунку складу бетону, а також мінімізації вмісту дрібних фракцій (менше 5 мм) негативний вплив переробленого заповнювача на повзучість і усадку зменшується [9].

Проте виникає проблема коректного розрахунку складу бетону. Серед вихідних даних для визначення вмісту складових бетонної суміші є в тому числі середня густина зерен крупного заповнювача. Кожна окрема зернина вторинного щебеню матиме густину відмінну від інших через різний вміст залишкового розчину на зернах. Причому із зменшенням розміру фракції ця відмінність буде посилюватись, оскільки очевидно, що в більш дрібних фракціях

можлива наявність зернин, що повністю складаються із залишкового розчину.

Отже, одним із методів поліпшення механічних властивостей бетону з вторинним крупним заповнювачем є зменшення вмісту залишкового розчину. Цей вміст визначається на етапі подрібнення бетонного бруксту. Тобто фактично під час подрібнення визначаються такі характеристики вторинного заповнювача як водопоглинання, щільність та модуль пружності.

Найбільш поширений метод первинного подрібнення шоковими дробарками, після якого зерна заповнювача мають більш пряму та кутасту форму, що сприяє збільшенню водопоглинання. Застосування ж додатково вторинного подрібнення, наприклад, молотковими дробарками, дозволяє зменшити вміст лещадних та голчастих зерен до допустимих 30 % і нижче, зменшити пористість щебеню і, таким чином, зменшити абсорбтивні властивості, підвищити опір карбонізації та проникненню хлоридів [15].

Суттєво ускладнює вивчення фізико-механічних властивостей вторинного щебеню відсутність в Україні нормативної документації, яка регулює підходи до випробувань. Діючі стандарти регламентують характеристики і методи їх визначення для однорідних за своїм складом матеріалів. Але через наявність залишкового розчину і, як наслідок, знижену густину заповнювача неможливо забезпечити нормативні маси аналітичних проб у заданих у нормах об'ємах, а для визначення марки за дробильністю в нормативній документації відсутні критерії для щебеню з відходів.

## Висновки

Головний чинник, що має визначальний вплив на властивості вторинних заповнювачів та бетонів з їх використанням – це наявність залишкового розчину. Регулювати його частку в загальній масі крупного заповнювача можна декількома способами. Крім наведеного вище методу додаткового подрібнення доцільним

виглядає спосіб обов'язкового фракціонування подрібненого бетонного брухту, визначення властивостей кожної окремої фракції з наступним утворенням суміші вторинного заповнювача шляхом перемішування фракцій. При цьому необхідно забезпечити вміст менших фракцій на мінімально допустимому рівні згідно з таблицею 3 ДСТУ [1].

Необхідно зазначити, що у великій кількості публікацій, проаналізованих під час дослідження, не контролювався зерновий склад заповнювачів або відсутні дані щодо зернового складу.

Як відомо, деяка частина зерен цементу не повністю гідратується. Тобто в

залишковому розчині вторинного щебеню наявні непрогідратовані зерна. Під час аналізу публікацій не виявлено досліджень щодо можливості їх активації і, таким чином, часткової нейтралізації негативного впливу підвищеної водопотреби бетонної суміші на міцність бетону.

У цілому проаналізовані результати існуючих досліджень дозволяють стверджувати про можливість застосування вторинного крупного заповнювача для виготовлення конструкційних бетонів, а також про перспективність подальших досліджень у цій сфері для визначення можливості виготовлення важких бетонів, у тому числі для відповідальних конструкцій.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 9208:2022. Бетони важкі. Технічні умови. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2023 р.
2. Морковська Н. Г., Абделрахем А. Переробка будівельних відходів, що утворюються в Україні. *Комунальне господарство міст*. 2019. Т. 1, № 147. С. 210–214.
3. Оцінка збитків. Damaged In Ua. URL: <https://damaged.in.ua/damage-assessment>.
4. Попович О. Р., Захарко Я. М., Мальований М. Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 321–324.
5. Buttler A. M., Machado E. F. Properties of Concrete with Recycled Concrete Coarse Aggregates. *ACI Spec. Publ.*, 2005. Vol. 229. Pp. 497–510.
6. 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.* 2016. Pp. 1–5.
7. De Pauw C., Vyncke J., Desmyter J. Reuse of demolition waste as aggregates in concrete. A new challenge or the re-introduction of old practice? *Sustainable Construction*. Tampa, Florida, USA, November 6–9, 1994. Pp. 385–394.
8. European Commission. The European construction sector. A global partner, Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Directorate General for Joint Research Centre. Retrieved June 14, 2018. URL: <http://ec.europa.eu/docsroom/documents/15866/attachments/1/translations/en/renditions/native>.
9. Fathifazl G., Razaqpur A. G. Creep Rheological Models for Recycled Aggregate Concrete. *ACI Mater. J.* 2014. Vol. 110, № 2. Pp. 115–126.
10. Ismail S., Kwan W.H., Ramli M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 296–306.
11. Kou S.-C., Poon C. S., Etxeberria M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties. *Cement & Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. Pp. 286–291.
12. Lye C., Dhir R., Ghataora G. Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates. *Institution of Civil Engineers. Proceedings. Structures and Buildings*. Birmingham, UK, 2016. Vol. 169. Pp. 314–339.
13. Ozbakkaloglu T., Gholampour A., Xie T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. Vol. 30 (2).
14. Pedro D., de Brito J., Evangelista L. Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 93. Pp. 63–74.
15. Pedro D., de Brito J., Evangelista L. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste – Influence of the crushing process. *Materials and Structures*. 2015. Vol. 48 (12). Pp. 3965–3978.
16. 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). Pp. 62–70.
17. Ulloa V. A., García-Taengua E., Pelufo M., Domingo A., Serna P. New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. *ACI Mater. J.* 2014. Vol. 110, no. 6. Pp. 687–696.

18. Yang K., Chung H., Ashour A. F. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Mater. J.* 2009. Vol. 105, № 3. Pp. 289–296.

## REFERENCES

1. DSTU 9208:2022. *Betony vazhki. Tekhnichni umovy* [DSTU 9208:2022. Normal-weight heavy concrete. Specifications]. Kyiv: SE “State Research Institute of Building Constructions”, 2023. (in Ukrainian).
2. Morkovska N.G. and Abdelrahem A. *Pererobka budivelnnykh vidkhodiv, shcho utvoriuiutsia v Ukraini* [Recycling construction waste generated in Ukraine]. *Komunalne hospodarstvo mist* [Communal Management of Cities]. 2019, vol. 1, iss. 147, pp. 210–214. (in Ukrainian).
3. *Otsinka zbytkiv* [Damage assessment]. Damaged In Ua. URL: <https://damaged.in.ua/damage-assessment> (in Ukrainian).
4. Popovych O.R., Zakharko Ya.M. and Maliovanyy M. *Problemy utylizatsii ta pererobky budivelnnykh vidkhodiv* [Problems of disposal and processing of construction waste]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politehnika”: Teoriia i praktyka budivnytstva* [Bulletin of the National University “Lviv Polytechnic”: Theory and Practice of Construction]. 2013, vol. 755, pp. 321–324. (in Ukrainian).
5. Buttler A.M. and Machado E.F. Properties of Concrete with Recycled Concrete Coarse Aggregates. *ACI Spec. Publ.*, 2005, vol. 229, pp. 497–510.
6. De Brito J. and Silva R.V. Current Status on the Use of Recycled Aggregates in Concrete : Where Do We Go From Here? *RILEM Tech. Lett.* 2016, pp. 1–5.
7. De Pauw C., Vyncke J. and Desmyter J. Reuse of demolition waste as aggregates in concrete. A new challenge or the re-introduction of old practice? *Sustainable Construction*. Tampa, Florida, USA, November 6–9, 1994, pp. 385–394.
8. European Commission. The European construction sector. A global partner, Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Directorate General for Joint Research Centre, Retrieved June 14, 2018. URL: <http://ec.europa.eu/docsroom/documents/15866/attachments/1/translations/en/renditions/native>.
9. Fathifazl G. and Razaqpur A.G. Creep Rheological Models for Recycled Aggregate Concrete. *ACI Mater. J.* 2014, vol. 110, no. 2, pp. 115–126.
10. Ismail S., Kwan W.H. and Ramli. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 155, pp. 296–306.
11. Kou S.-C., Poon C.S. and Etxeberria M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties. *Cement & Concrete Composites*. 2011, vol. 33, pp. 286–291.
12. Lye C., Dhir R. and Ghataora G. Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates. *Institution of Civil Engineers. Proceedings. Structures and Buildings*. Birmingham, UK, 2016, vol. 169, pp. 314–339.
13. Ozbakkaloglu T., Gholampour A. and Xie T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018, vol. 30 (2).
14. Pedro D., de Brito J. and Evangelista L. Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume. *Cement and Concrete Composites*. 2018, vol. 93, pp. 63–74.
15. Pedro D., de Brito J. and Evangelista L. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste – Influence of the crushing process. *Materials and Structures*. 2015, vol. 48 (12), pp. 3965–3978.
16. Richardson A.E., Coventry K. and Graham S. Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey*. University of Northumbria, Newcastle upon Tyne, UK, 2009, vol. 27 (1), pp. 62–70.
17. Ulloa V.A., García-Taengua E., Pelufo M., Domingo A. and Serna P. New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. *ACI Mater. J.* 2014, vol. 110, no. 6, pp. 687–696.
18. Yang K., Chung H. and Ashour A.F. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Mater. J.* 2009, vol. 105, no. 3, pp. 289–296.

Надійшла до редакції: 07.10.2023.