

УДК 338.45:69.003
DOI: 10.60022/3(2)-13S

Валовой Олександр Іванович

кандидат технічних наук, професор
завідувач кафедри промислового, цивільного та міського будівництва
Криворізький національний університет, Україна

Valovyi Olexsandr Ivanovych

PhD in Technical Sciences, Professor
Head of the Department of Industrial, Civil and Urban Construction
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0004-2939-3028

Валовой Максим Олександрович

кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри промислового, цивільного та міського будівництва
Криворізький національний університет, Україна

Valovyi Maksym Olexsandrovych

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Urban Construction
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0004-4623-4248

Балаба Денис Валерійович

здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Криворізький національний університет, Україна

Balaba Denys

higher education student at the first (Bachelor's) level
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0002-9609-8219

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВІДХОДІВ ПОДРІБНЕНОГО БЕТОНУ ЯК ЗАПОВНЮВАЧА У БЕТОНАХ

Анотація. У статті розглянуто способи та методи використання подрібненого бетону з будівельних відходів як вторинного заповнювача при виконанні бетонних робіт. Проаналізовано технологічні підходи до переробки бетонного лому, особливості формування фракційного складу вторинних заповнювачів і їх вплив на міцнісні характеристики бетонів. Особливу увагу приділено результатам експериментальних досліджень бетонних сумішей із використанням традиційних і вторинних заповнювачів, що дозволило оцінити рівень зниження міцності та можливості практичного застосування таких матеріалів. Показано, що за умови раціональної підготовки подрібненого бетону отримані бетонні суміші забезпечують нормативно достатні експлуатаційні характеристики. З економічної точки зору повторне використання бетонних відходів розглядається як інструмент оптимізації матеріальних витрат, зниження залежності від природних мінеральних ресурсів і підвищення ресурсної ефективності будівельного виробництва, особливо в умовах масштабного відновлення інфраструктури.

Ключові слова: вторинні заповнювачі, подрібнений бетон, бетонні роботи, економічна ефективність, будівельні відходи, ресурсозбереження.

ECONOMIC EFFICIENCY OF USING CRUSHED CONCRETE WASTE AS AGGREGATE IN CONCRETE

Abstract. Large-scale destruction of buildings and infrastructure has resulted in the accumulation of substantial volumes of concrete and reinforced concrete waste, which necessitates not only organized disposal but also economically justified reuse within construction activities. Under conditions of limited availability of natural mineral aggregates, rising material prices, and increased costs of construction works, crushed



concrete waste is increasingly considered as a potential secondary aggregate capable of reducing material costs and improving resource efficiency. This study analyzes methods and techniques for the use of crushed concrete waste as a secondary aggregate in concrete works, taking into account technological aspects of processing, strength performance of concrete, and key economic factors influencing practical implementation. The research summarizes current approaches to concrete waste crushing, fractionation, and preparation, emphasizing the role of particle-size distribution and aggregate cleanliness in ensuring stable concrete properties. An experimental program was conducted to assess the compressive strength of concrete mixtures containing various combinations of traditional and recycled aggregates, including natural granite aggregate, crushed concrete, river sand, and beneficiation waste sand. The results indicate that concretes incorporating crushed concrete aggregates demonstrate a moderate decrease in compressive strength compared to reference mixes with natural aggregates; however, the obtained values remain sufficient for practical application in a wide range of concrete works with moderate structural requirements. The observed variability in strength characteristics is primarily associated with the presence of fine particles and residual cement paste in recycled aggregates, which affects interfacial bonding within the concrete matrix. From an economic perspective, the reuse of concrete waste is considered as an independent production and logistics process, the efficiency of which is largely determined by transportation costs, processing expenses, organizational factors, and the scale of implementation. The study concludes that, under rational processing conditions and appropriate quality control, crushed concrete waste can be regarded as a viable secondary resource that contributes to cost optimization, reduced dependence on natural aggregates, and improved overall resource efficiency of construction production, particularly in the context of large-scale infrastructure recovery.

Keywords: recycled aggregates, crushed concrete, concrete works, economic efficiency, construction waste, resource efficiency.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку будівельної галузі України питання раціонального використання матеріальних ресурсів набуває особливої актуальності в контексті масштабних руйнувань інфраструктури та необхідності її відновлення. За оцінками аналітичного звіту щодо збитків і потреб відновлення України, станом на листопад 2024 року загальний обсяг прямих збитків фізичній інфраструктурі склали майже 170 млрд дол. США, при цьому понад 35 % втрат припадає на житловий фонд [1, с. 4].

Процеси демонтажу зруйнованих і пошкоджених об'єктів супроводжуються утворенням значних обсягів будівельних відходів, насамперед бетонного та залізобетонного лому. У звіті зазначено, що лише в житловому секторі зафіксовано пошкодження або руйнування близько 236 тис. будівель різного ступеня, що формує масштабні потоки інертних відходів, які потребують організованого поводження [1, с. 7]. У більшості випадків такі матеріали не залучаються до повторного використання, що призводить до додаткових витрат на транспортування та захоронення, а також до втрати потенційно придатної вторинної сировини.

Паралельно зі зростанням обсягів будівельних відходів спостерігається підвищення вартості будівельних матеріалів, зокрема природних мінеральних заповнювачів, що зумовлено обмеженістю ресурсної бази, порушенням логістичних ланцюгів і пошкодженням транспортної інфраструктури. Сукупний вплив цих чинників призводить до зростання вартості відновлювальних робіт і ускладнює реалізацію інфраструктурних проєктів у післявоєнний період, посилюючи потребу в пошуку альтернативних матеріальних рішень у будівельному виробництві.

У таких умовах повторне використання подрібненого бетону з будівельних відходів як вторинного заповнювача доцільно розглядати не лише як технічну альтернативу природним матеріалам, а як інструмент оптимізації матеріальних і фінансових потоків у будівельному виробництві. Залучення вторинних заповнювачів потенційно дозволяє скоротити витрати на закупівлю та транспортування природної сировини, зменшити навантаження на систему поводження з відходами та підвищити загальну ресурсну ефективність відновлювальних процесів.

Водночас економічна доцільність використання подрібненого бетону визначається не лише обсягами утворення відходів, а й властивостями отриманого матеріалу, технологією його переробки, стабільністю характеристик та можливістю забезпечення нормативних показників бетонних сумішей без суттєвого зростання виробничих витрат. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу способів і методів використання подрібненого бетону з відходів як заповнювача при виконанні бетонних робіт з урахуванням технологічних, матеріалознавчих і економічних чинників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових роботах дедалі частіше розглядаються питання повторного використання бетонних і залізобетонних відходів як вторинного заповнювача у бетонних сумішах та конструкціях. Такий підхід розглядається як спосіб одночасного

вирішення проблеми утилізації великомасштабних будівельних відходів і зменшення потреби в природних мінеральних матеріалах у будівництві [2, с. 121–126; 3, с. 19–26]. У межах цих досліджень аналізуються як загальні напрями застосування подрібненого бетону, так і умови його ефективного використання у складі бетонних сумішей.

Окрему групу становлять роботи, присвячені технологіям дроблення бетонного лому та підготовці вторинних заповнювачів. У таких дослідженнях розглядаються різні схеми механічного руйнування бетонних конструкцій, підбір дробильного обладнання, процеси фракціонування матеріалу та методи відокремлення арматури й сторонніх домішок. Зазначається, що оптимізація режимів дроблення та очищення матеріалу є визначальним чинником формування однорідного вторинного щебеню з прогнозованими властивостями [4, с. 135–140; 5, с. 5–10].

Значна увага у публікаціях приділяється дослідженню фізико-механічних властивостей вторинних заповнювачів і бетонів на їх основі. Автори аналізують вплив гранулометричного складу, пористості та міцності зерен подрібненого бетону на показники міцності, деформативності та водопоглинання бетонних сумішей. Отримані результати свідчать, що за дотримання раціональних технологічних параметрів вторинні заповнювачі можуть використовуватися в бетонах із помірними вимогами до експлуатаційних характеристик [2, с. 121–126; 3, с. 19–26].

У сучасних закордонних дослідженнях повторне використання подрібненого бетону розглядається передусім у контексті дорожнього будівництва, зокрема при влаштуванні основ і підоснов дорожнього одягу. У роботах наголошується, що вторинні заповнювачі, отримані з бетонних відходів, можуть ефективно застосовуватися як альтернатива природному щебеню за умови контролю їх гранулометричного складу та фізико-механічних характеристик [6, с. 1–17].

У публікаціях також відзначається, що експлуатаційні показники дорожніх конструкцій із використанням подрібненого бетону значною мірою залежать від умов водовідведення, щільності ущільнення та структури порового простору матеріалу. Зокрема, результати лабораторних і чисельних досліджень свідчать про достатню довговічність основ дорожнього одягу з використанням вторинного щебеню за умови дотримання раціональних конструктивних і технологічних рішень [7, с. 1–17].

Закордонний досвід підтверджує, що повторне використання бетонного лому у дорожніх роботах дозволяє зменшити споживання природних мінеральних ресурсів і скоротити обсяги будівельних відходів без істотного погіршення експлуатаційних характеристик конструкцій. Водночас у дослідженнях підкреслюється необхідність адаптації таких рішень до конкретних умов застосування з урахуванням транспортних навантажень, кліматичних факторів і організаційних аспектів впровадження технологій рециклінгу бетону [6, с. 1–17; 7, с. 1–17].

Окремі дослідження присвячені аналізу поведінки бетонних сумішей із вторинними заповнювачами на стадії приготування. У межах таких досліджень показано, що заміна природних заповнювачів подрібненим бетоном впливає на рухливість і стабільність сумішей, що пов'язано з підвищеним водопоглинанням зерен та наявністю залишкового цементного каменю. Зазначається, що забезпечення заданих технологічних властивостей у цьому випадку потребує коригування складу бетонної суміші, зокрема оптимізації зернового складу та застосування хімічних добавок [8, с. 19–31].

У закордонних дослідженнях [9, с. 1–11] окрему увагу приділено впливу методу дроблення на властивості вторинних заповнювачів. Показано, що застосування різних типів дробильних установок, зокрема щоккових та ударних дробарок, призводить до формування заповнювачів із відмінною гранулометрією та морфологією зерен. Зокрема, використання ударних дробарок забезпечує більш округлу форму зерен, проте супроводжується підвищеним вмістом дрібних фракцій, тоді як щоккове дроблення дозволяє отримати більш однорідний матеріал із меншим утворенням пилоподібних частинок. При цьому встановлено, що сам метод дроблення має обмежений вплив на вміст залишкового цементного каменю та водопоглинання вторинного щебеню, які в більшій мірі визначаються складом вихідного бетону та розміром фракцій.

Разом із тим узагальнення результатів наявних досліджень [2–9] показує, що за детального опрацювання технологій дроблення та властивостей вторинних заповнювачів економічні аспекти їх використання залишаються висвітленими недостатньо. У більшості робіт основний акцент зроблено на матеріалознавчих і технологічних характеристиках, тоді як питання витрат на переробку бетонних відходів, транспортне забезпечення та організацію виробництва вторинних заповнювачів розглядаються лише побіжно. Крім того, обмеженою залишається інформація щодо можливостей масштабування таких рішень і їх практичної реалізації в умовах масового будівництва, що свідчить про доцільність подальшого комплексного аналізу способів і методів використання подрібненого бетону при виконанні бетонних робіт.

Метою статті є узагальнення та оцінювання способів використання подрібненого бетону з відходів як вторинного заповнювача у бетонних роботах з урахуванням технологічних умов його

переробки, міцнісних показників бетонів на його основі, а також економічних факторів, що впливають на доцільність і практичну реалізацію таких рішень у будівельному виробництві.

Виклад основного матеріалу. Повторне використання бетонних відходів у будівництві доцільно розглядати не лише як технічну можливість, а як окремий економічний процес, у межах якого формується новий матеріальний ресурс. На відміну від природних заповнювачів, вторинний бетон не є готовим продуктом, а потребує виконання низки додаткових операцій, пов'язаних зі збиранням, підготовкою та переробкою відходів. Саме сукупність цих операцій визначає рівень витрат і, відповідно, економічну доцільність залучення подрібненого бетону до будівельного виробництва.

Особливістю такого підходу є те, що економічні показники повторного використання бетонних відходів значною мірою залежать від конкретних умов їх утворення та переробки. Обсяги відходів, характер забудови, відстані транспортування, а також наявність або відсутність спеціалізованої інфраструктури можуть суттєво впливати на структуру витрат. У зв'язку з цим економічна ефективність використання вторинних заповнювачів не може оцінюватися за єдиною універсальною схемою і потребує комплексного аналізу з урахуванням організаційних та логістичних чинників.

Загальні витрати на повторне використання бетонних відходів складаються з витрат на окремі стадії їх переробки:

$$C = C_d + C_t + C_p + C_o \quad (1)$$

де C_d – витрати на демонтаж і збирання; C_t – транспортні витрати; C_p – витрати на механічну переробку (дроблення, сортування); C_o – організаційні витрати (контроль якості, управління потоками матеріалів).

У складі сукупних витрат, пов'язаних із повторним використанням бетонних відходів, окремі елементи відіграють різну роль у формуванні собівартості вторинного заповнювача. Витрати на демонтаж і збирання бетонного лому, як правило, є фіксованими, оскільки такі роботи виконуються незалежно від подальшого способу використання матеріалу. Витрати на механічну переробку, зокрема дроблення та сортування, мають більш передбачуваний характер і можуть зменшуватися зі зростанням обсягів переробки зарахунок раціоналізації виробничого процесу. Водночас транспортні та організаційні витрати характеризуються значною варіативністю і суттєво залежать від просторового розміщення об'єктів, обсягів утворення відходів та рівня організації робіт. Саме ці складові часто визначають економічну межу доцільності використання подрібненого бетону і виступають стримувальним чинником для широкого впровадження таких рішень у практиці масового будівництва.

Накопичений досвід досліджень [2-9] свідчить, що результати використання вторинних заповнювачів у бетонних сумішах істотно залежать від їх походження, фракційного складу та поєднання з традиційними матеріалами. За однакових загальних підходів до приготування бетонів фактичні міцнісні показники можуть відрізнятися залежно від конкретних умов та складу суміші, що ускладнює пряме перенесення узагальнених рекомендацій у практику.

Водночас слід враховувати, що дрібні фракції подрібненого бетону, збагачені продуктами цементного каменю, суттєво відрізняються за властивостями від крупного вторинного заповнювача і потребують окремого підходу до використання. Практика переробки бетонних відходів свідчить про доцільність їх відокремлення на стадії дроблення та сортування, що дозволяє спрямовувати дрібні фракції на альтернативні напрями використання та забезпечувати стабільні характеристики основного заповнювача. Такий підхід спрощує прогнозування поведінки вторинних матеріалів у бетонних сумішах і підвищує керованість технологічного процесу.

У практиці переробки бетонних відходів також розглядаються способи додаткової механічної або термомеханічної обробки вторинного заповнювача з метою зменшення вмісту залишкового цементного каменю та підвищення стабільності його властивостей. Застосування таких технологій дозволяє покращити якісні показники щебеню, однак супроводжується зростанням енергетичних і виробничих витрат. У зв'язку з цим використання методів активації доцільно розглядати не як універсальне рішення, а як спеціалізований інструмент, економічна ефективність якого визначається масштабами переробки та вимогами до кінцевого продукту.

Оцінювання економічної доцільності повторного використання бетонних відходів не може обмежуватися лише аналізом витрат, оскільки визначальну роль відіграють властивості матеріалу, отриманого після переробки. За однакових організаційних і логістичних умов підсумковий економічний результат значною мірою залежить від того, наскільки подрібнений бетон здатний забезпечити задані характеристики бетонних сумішей і виробів без необхідності додаткового коригування складу або технологічних режимів. У цьому сенсі спосіб дроблення, якість сформованих заповнювачів та результати їх використання у бетоні мають не лише технічне, але й пряме економічне значення. З огляду на це подальший виклад присвячено розгляду технологічних аспектів переробки бетонних відходів і

аналізу властивостей бетонів із вторинними заповнювачами як основи для подальшого економічного обґрунтування доцільності таких рішень.

У зв'язку з викладеним доцільним є експериментальне дослідження бетонних сумішей із використанням різних видів традиційних і вторинних заповнювачів у контрольованих умовах. Такий підхід дозволяє отримати порівняльні дані щодо впливу складу суміші на міцність бетону та слугує основою для подальшої оцінки можливостей застосування вторинних матеріалів при виконанні бетонних робіт.

Для перевірки наведених положень проводилися експериментальні дослідження в лабораторії кафедри промислового, цивільного та міського будівництва Криворізького національного університету із залученням учасників студентського наукового гуртка. Під час досліджень застосовувалися як традиційні, так і вторинні матеріали, зокрема річковий пісок, гранітний щебінь, подрібнена цегла, дроблений бетон, а також пісок із відходів збагачення залізних руд. Вторинний бетонний матеріал одержували шляхом руйнування залізобетонної балки у лабораторних умовах з подальшою підготовкою до використання в складі бетонних сумішей.

На основному етапі роботи здійснювалося виготовлення та випробування бетонних зразків. Крупні заповнювачі попередньо піддавалися ситовому аналізу з відбором фракції 5–20 мм, після чого готувалися бетонні суміші з різними поєднаннями традиційних і вторинних матеріалів. Приготовані суміші укладалися в металеві форми (рис. 1), ущільнювалися за допомогою вібрації та маркувалися відповідно до серії досліджень. Сформовані зразки витримувалися протягом 28 діб у контрольованих температурних умовах до розпалубки й подальшого випробування.



Рис. 1. Завантаження бетонної суміші у форми
Джерело: сформовано авторами

З метою характеристики міцнісних властивостей бетонів, виготовлених із використанням традиційних і вторинних заповнювачів, у роботі визначалися показники кубикової та призмової міцності [10]. Оцінювання здійснювалося на стандартних бетонних зразках, отриманих із досліджуваних сумішей. Кубикова міцність встановлювалася за результатами випробування кубічних зразків стандартного розміру $150 \times 150 \times 150$ мм (рис. 2), тоді як призмova міцність визначалась на призматичних зразках розміром $150 \times 150 \times 600$ мм (рис. 3), що дало змогу врахувати вплив геометрії зразка та характеру напруженого стану на отримані значення міцності.



Рис. 2. Форма для кубів стандартного розміру $150 \times 150 \times 150$ мм
Джерело: сформовано авторами



Рис. 3. Форма для призми стандартного розміру $150 \times 150 \times 600$ мм
Джерело: сформовано авторами

У межах експериментальних досліджень було виготовлено 4 серії бетонних зразків із різними комбінаціями традиційних і вторинних заповнювачів, до складу кожної серії входили кубічні та призматичні зразки. Після твердіння зразки випробовувалися на стиск у гідравлічному пресі (рис. 4, 5) з реєстрацією максимального навантаження, на основі якого визначалися показники міцності. Для кожного складу досліджували по три зразки з подальшим визначенням середніх значень.



Рис. 4. Проведення експерименту з кубами
Джерело: сформовано авторами



Рис. 5. Проведення експерименту з призмами
Джерело: сформовано авторами

Отримані результати подано у вигляді таблиці 1, що дає змогу провести порівняльну оцінку впливу типу заповнювача на міцнісні властивості бетону.

Таблиця 1

Результати визначення міцності бетону на стиск у віці 28 діб

№ серії зразків	Матеріал	Середнє значення, МПа
1	Граніт, річковий пісок, цемент М500	65,7
2	Граніт, ММС, цемент М500	66,69
3	Бой бетону, річковий пісок, цемент М500	56,88
4	Бой бетону, ММС, цемент М500	57,86

Джерело: складено авторами

Результати експериментальних випробувань показали, що введення вторинних заповнювачів до складу бетонних сумішей супроводжується зниженням міцності на стиск у порівнянні з бетонами на природному гранітному щебені, проте отримані відмінності не мають принципового характеру. Для бетонів із використанням дробленого бетону середні значення міцності перебували в межах 56,9–57,9 МПа, що відповідає зменшенню показників приблизно на 12–15% відносно контрольних складів. Такі значення залишаються достатніми для застосування у бетонних роботах із середніми вимогами до несучої здатності. Зафіксовані коливання міцності, ймовірно, обумовлені наявністю пилу та залишків цементного каменю у вторинному щебені, що впливає на якість зчеплення компонентів суміші. Разом з тим наближеність отриманих результатів до характеристик бетонів на природних заповнювачах свідчить про реальну можливість використання дробленого бетону як вторинного ресурсу за умови належної підготовки матеріалу та обґрунтованого вибору напрямів його практичного застосування.

Висновки. Проведене дослідження показало, що подрібнений бетон з відходів може використовуватися як вторинний заповнювач у бетонних роботах за умови належної організації процесів його переробки та підготовки. При цьому доцільність такого підходу визначається не прагненням до досягнення граничних міцнісних показників, а забезпеченням нормативно достатніх експлуатаційних характеристик бетонів із одночасним скороченням споживання природних мінеральних ресурсів.

Експериментальні випробування засвідчили, що введення дробленого бетону до складу бетонних сумішей супроводжується певним зниженням міцності на стиск порівняно з бетонами на природному гранітному заповнювачі. Водночас зафіксовані значення залишаються придатними для практичного застосування у широкому спектрі бетонних робіт. Встановлено, що стабільність властивостей таких бетонів значною мірою залежить від фракційного складу вторинного заповнювача та рівня його очищення від пилоподібних частинок, залишків цементного каменю й сторонніх домішок.

З економічної точки зору повторне залучення бетонних відходів до будівельного виробництва доцільно розглядати як самостійний виробничо-логістичний процес, ефективність якого визначається витратами на переробку, транспортування та організацію матеріальних потоків. В умовах масового будівництва та відновлення інфраструктури використання вторинних заповнювачів створює передумови для зниження залежності від природної сировини, оптимізації витрат на матеріали та підвищення загальної ресурсної ефективності будівельної галузі.

Подальший розвиток цього напрямку доцільно орієнтувати на поглиблений аналіз економічної ефективності використання бетонів із вторинними заповнювачами з урахуванням їх довговічності та поведінки в реальних будівельних конструкціях. Важливим є оцінювання впливу таких рішень на собівартість будівельних робіт, витрати на матеріали та логістичне забезпечення з урахуванням регіональних умов і обсягів утворення будівельних відходів. Це дозволить обґрунтувати доцільність впровадження вторинних заповнювачів не лише з технічної, а й з економічної точки зору в умовах масового будівництва та відновлення інфраструктури.

Література

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на листопад 2024 року : К: КІШЕ, 2025. – 28 с.
2. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Нікітинський А. В., Романенко О. В., Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2023. – Вип. 206. – С. 121–128. – DOI: 10.18664/1994-7852.206.2023.296685.
3. Савицький, М., & Смирнов, А. (2024). Властивості вторинних крупних заповнювачів, отриманих в результаті подрібнення бетонних відходів. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (14), 19–28. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>.
4. Трикоз Л. В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів / Л. В. Трикоз, О. С. Зінченко, А. В. Нікітинський // Науковий вісник будівництва. - 2024. - № 111. - С. 135-141.
5. Грабовчак, В. В., & Ковальчук, О. Ю. (2025). ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕЦИРКУЛЬОВАНИХ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У СКЛАДІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ. Теорія та практика дизайну, (34), 5–10. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.34.1>.
6. Fanijo E., Kolawole J., Babafemi A. J., Liu J. A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. // Cleaner Materials. – 2023. – Vol. 9. – Art. 100199 – DOI:10.1016/j.clema.2023.100199.
7. Ali, S. A., Cancino Arevalo, P., Zaman, M., Floyd, R. W., Hossain, Z., & Rojas-Pochyla, J. (2025). Durability of Recycled Concrete Aggregate as a Pavement Base Material Including Drainage: A Laboratory and Simulation Study. Sustainability, 17(13), 6050. <https://doi.org/10.3390/su17136050>.

8. Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. Fresh-State Performance of Recycled Aggregate Concrete: A Review // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 178. – P. 19–31. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

9. Hubert, J., Zhao, Z., Michel, F., & Courard, L. (2023). Effect of Crushing Method on the Properties of Produced Recycled Concrete Aggregates. *Buildings*, 13(9), 2217. <https://doi.org/10.3390/buildings13092217>

10. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [На заміну ГОСТ 10180-90; чинний з 01.09.2010]. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК). 43 с.

References

1. Report on damages to infrastructure from the destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine as of November 2024 : K: KSE, 2025. – 28 с.

2. Trykoz L. V., Zinchenko O. S., Nikitynskyi A. V., Romanenko O. V., Particle-size distribution assessment of the recycled aggregates from concrete remains // *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. – 2023. – Issue 206. – P. 121–128. – DOI: 10.18664/1994-7852.206.2023.296685.

3. Savytskyi, M. ., & Smyrnov, A. . (2024). Properties of recycled coarse aggregates obtained from crushed concrete waste. *Building Constructions. Theory and Practice*, (14), 19–28. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>.

4. Trykoz L. V. Determination of strength and structural characteristics of cement-sand mortars with recycling fillers / L. V. Trykoz, O. S. Zinchenko, A. V. Nykytynskyi // *Scientific Bulletin of Construction*. - 2024. - № 111. - P. 135-141.

5. Grabovchak, V., & Kovalchuk, O. (2025). PECULIARITIES OF USING RECYCLED CONCRETE STRUCTURES AS PART OF CONCRETE MIXTURES. *Theory and Practice of Design*, (34), 5–10. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.34.1>.

6. Fanijo E., Kolawole J., Babafemi A. J., Liu J. A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. // *Cleaner Materials*. – 2023. – Vol. 9. – Art. 100199 – DOI:10.1016/j.clema.2023.100199.

7. Ali, S. A., Cancino Arevalo, P., Zaman, M., Floyd, R. W., Hossain, Z., & Rojas-Pochyla, J. (2025). Durability of Recycled Concrete Aggregate as a Pavement Base Material Including Drainage: A Laboratory and Simulation Study. *Sustainability*, 17(13), 6050. <https://doi.org/10.3390/su17136050>.

8. Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. Fresh-State Performance of Recycled Aggregate Concrete: A Review // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 178. – P. 19–31. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

9. Hubert, J., Zhao, Z., Michel, F., & Courard, L. (2023). Effect of Crushing Method on the Properties of Produced Recycled Concrete Aggregates. *Buildings*, 13(9), 2217. <https://doi.org/10.3390/buildings13092217>

10. DSTU B V.2.7-214:2009. Building materials. Concrete. Methods for determining strength using control specimens. National Standard of Ukraine [replacing GOST 10180-90; effective from 01.09.2010]. Kyiv: State Enterprise «State Research Institute of Building Constructions», 2009. 43 p.

Отримано: 20.01.2026

Прийнято до публікації: 29.01.2026

Опубліковано: 15.02.2026