

УДК 624.01:691.32

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083

## ВПЛИВ ВИДУ ОБРОБКИ РЕЦИКЛІНГОВИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ

ТРИКОЗ Л. В.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,

ЗІНЧЕНКО О. С.<sup>2</sup>, *асп.*,

КАЛІНІН О. А.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,

НИКИТИНСЬКИЙ А. В.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-68, e-mail: [lvtrikoz@ukr.net](mailto:lvtrikoz@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8531-7546

<sup>2</sup> Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-68, e-mail: [potatosrumba@gmail.com](mailto:potatosrumba@gmail.com), ORCID ID: 0009-0000-3858-8258

<sup>3</sup> Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-63, e-mail: [oleg.kalinin.63@gmail.com](mailto:oleg.kalinin.63@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3063-5659

<sup>4</sup> Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-63, e-mail: [NykytynskiyAV@kart.edu.ua](mailto:NykytynskiyAV@kart.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-4923-8568

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року передбачено створення умов для розвитку ринку використання перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, зокрема, шляхом визначення показників для встановлення нормативів для перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, які забезпечать їх повторне використання та утилізацію. Один із способів повторного використання зруйнованого бетону – отримання з нього крупного і дрібного заповнювача для подальшого виробництва будівельних матеріалів і виробів. Традиційний метод отримання вторинного заповнювача містить етапи дроблення, які не дозволяють відновлювати чисті, тобто безцементні, заповнювачі. Отже, для виробництва високоякісних перероблених заповнювачів потрібен пошук ефективних методів обробки заповнювачів. **Мета дослідження** – оцінення міцності за стиску бетонних зразків із використанням заповнювачів, отриманих із відходів залізобетонних залізничних шпал. Зроблено порівняння міцності бетонів на заповнювачах, які були очищені механічною обробкою або просочені розчином силікату натрію. **Висновки.** Встановлено, що як механічне очищення від залишків старого цементно-піщаного розчину, так і просочення поліпшують фізико-механічні властивості бетону порівняно з бетоном на необробленому заповнювачі. Механічна обробка підвищує міцність на стиск і становить 98 % від міцності бетону на натуральних заповнювачах. Просочення силікатом натрію збільшує міцність бетону порівняно з міцністю на необробленому заповнювачі на 10 %. Отже, обидва способи обробки рециклінгових крупних заповнювачів можна використовувати для отримання бетонів відповідної міцності.

**Ключові слова:** бетон; крупний заповнювач; обробка; міцність за стиску; рециклінг

## IMPACT THE TREATMENT TYPES OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES ON CONCRETE STRENGTH

TRYKOZ L.V.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

ZINCHENKO O.S.<sup>2</sup>, *Postgrad. Stud.*,

KALININ O.A.<sup>3</sup>, *PhD (Tech.), Assoc. Prof.*,

NYKYTYNSKYI A.V.<sup>4</sup>, *PhD (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-68, e-mail: [lvtrikoz@ukr.net](mailto:lvtrikoz@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8531-7546

<sup>2</sup> Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-68, e-mail: [potatosrumba@gmail.com](mailto:potatosrumba@gmail.com), ORCID ID: 0009-0000-3858-8258

<sup>3</sup> Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-63, e-mail: [oleg.kalinin.63@gmail.com](mailto:oleg.kalinin.63@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3063-5659

<sup>4</sup> Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-63, e-mail: [NykytynskiyAV@kart.edu.ua](mailto:NykytynskiyAV@kart.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-4923-8568

**Abstract. Problem statement.** The National Strategy of waste management in Ukraine until 2030 provides the creation of conditions for market development of usage recycled construction and demolishing waste including the ways of characteristic determination to obtain the regulations for recycled construction and demolishing waste that will let re-use and disposal. One of ways the re-use of deconstructed concrete is the obtaining coarse and fine aggregates for subsequent manufacturing of building materials and products. The ordinary way of recycled aggregates obtaining includes crushing stages that do not allow recovering the purified, i. e. cement-free, aggregates. Therefore, it is necessary to search the effective methods of treatments for producing high quality recycled aggregates. **The purpose of the article** is compressive strength evaluation of concrete samples with usage of aggregates obtained from waste of railway reinforcement concrete sleepers. The comparison of concrete strength has been done for coarse aggregates which are cleaned with mechanical treatment or impregnation by sodium silicate solution. **Conclusions.** It is established that both the mechanical purification from old cement-sand mortar rests and impregnation enhance physical and mechanical properties concrete comparing to concrete with untreated aggregates. The mechanical treatment increases the compressive strength and reaches 98 % of compressive strength for concrete with natural aggregates. The impregnation of sodium silicate increases at 10 % concrete strength compare with strength of concrete with untreated aggregates. So, both treatment methods of recycled coarse aggregates can be used for concrete manufacturing with appropriate strength.

**Keywords:** concrete; coarse aggregate; treatment; compressive strength; recycling

**Постановка проблеми.** Властивості виробленого з бетону вторинного заповнювача вивчаються з кінця 1970-х років, але його використання для будівництва нещодавно привернуло нову увагу, оскільки з роками зросло визнання значення сталого розвитку та захисту навколишнього середовища. Особливої актуальності набуває ця проблема з погляду необхідності переробки великої кількості зруйнованих конструкцій в умовах бойових дій в Україні.

Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року [4] передбачає створення умов для розвитку ринку використання перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, зокрема, шляхом визначення показників для встановлення нормативів для перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, які забезпечать повторне використання та утилізацію таких відходів; розроблення нормативів використання вторинної сировини з відходів будівельно-ремонтних робіт як матеріалів у будівельній галузі; розроблення механізмів гарантування якості перероблених матеріалів та економічних стимулів щодо заохочення їх використання; розвиток ринку перероблених матеріалів із відходів будівельно-ремонтних робіт; розроблення планів управління відходами будівельно-ремонтних робіт та їх інтеграція

до проектно-кошторисної документації щодо будівництва і реконструкції будівель та споруд. Аналіз сучасного стану поводження з відходами свідчить про негативний вплив на навколишнє середовище відходів будівельної діяльності і відсутність державного підходу до їх утилізації [5].

Один із способів повторного використання зруйнованого бетону – це отримання з нього крупного і дрібного заповнювача для подальшого виробництва будівельних матеріалів і виробів [6]. Традиційний метод отримання вторинного заповнювача містить етапи дроблення, які не дозволяють відновлювати звільнені, тобто безцементні, заповнювачі. Ці методи застосовують високі напруження стиску, які не досить ефективні для поставленої мети.

Завдяки високій міцності бетону на стиск вони забезпечують інтенсивне подрібнення не тільки бетонної матриці, а й самих заповнювачів. Крім того, кількість отриманих таким способом щебеню і піску дуже низька. Як наслідок, перероблені заповнювачі для бетону містять різну кількість налиплого цементного розчину, який негативно впливає на оброблюваність і механічні властивості бетону.

Таким чином, перероблені бетонні заповнювачі не збагачуються як заповнювачі для нового виробництва

бетону, а в основному переробляються як матеріали для дорожніх покриттів. Отже, для виробництва високоякісних перероблених заповнювачів потрібен пошук ефективних методів обробки заповнювачів.

**Аналіз публікацій.** Наявність прикріпленого розчину становить основну причину нижчої якості наповнювача з переробленого бетону порівняно з натуральним заповнювачем, і нині його використання обмежене до 30 % заміни природного наповнювача. Проблемі підвищення якості рециклінгових заповнювачів присвячено багато публікацій вітчизняних та закордонних дослідників, які пропонують різноманітні види обробки щебеню, отриманого з бетонних відходів – механічна, кислотна, термічна, мікрохвильова, поверхнева. Ці методи дозволяють або видалити шар старого цементно-піщаного розчину, або зміцнити його.

Для видалення старого розчину застосовують подрібнення в кульових млинах, нагрівання або дію кислотою. За механічної обробки в результаті комбінованої дії стирання, удару та подрібнення в обертовому барабані, що містить помольні кулі, налиплий розчин можна видалити, не викликаючи серйозного пошкодження самого щебеню. Тривалість обробки коливається від 10 хв [13] до 3 і навіть 5 годин [11]. Така обробка не тільки видаляє залишки розчину, а й сприяє збільшенню обкоченості зерен, що в подальшому вплине на рухливість бетонної суміші і кінцеві показники міцності бетону.

Наступний вид видалення старого цементно-піщаного розчину – шляхом нагрівання до температур від 300 до 900° С [13]. Принцип термічної обробки полягає у зневодненні старого цементного каменю, що сприяє відділенню шару старого розчину від частинок заповнювача. У свою чергу, саме необхідність кількогодінного нагрівання і подальшого механічного стирання стало суттєвим недоліком цього способу.

Для зменшення витрат енергії в дослідженні [7] представлено інноваційний метод переробки бетонних відходів, що

грунтується на ослабленні бетону за допомогою мікрохвильового нагрівання перед ударним дробленням. Результати показали, що мікрохвильове нагрівання завжди викликало підвищення крихкості зразків бетону, що знижувало енергію руйнування, сприяло більш високій фрагментації зразків і більшому вивільненню заповнювачів від цементного розчину.

Обробка кислотою – звичайний підхід до зменшення або видалення шару старого розчину, оскільки лужний розчин можна розчинити в кислоті. У праці [17] механічно оброблені зразки вторинних заповнювачів спочатку занурювали у водний розчин HCl і H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> чотирьох різних концентрацій за температури навколишнього середовища. Концентрація розчину кислоти – ключовий фактор, що впливає на результати обробки, на відміну від часу замочування, який суттєво не вплинув на кількість видаленого розчину.

До недоліків цього способу обробки можна віднести необхідність промивання рециркульованого щебеню для видалення кислотного розчинника, а також велику ймовірність подальшої корозії арматури і бетону на такому заповнювачі.

Водночас не менше уваги в дослідженнях приділяють іншому шляху поліпшення властивостей перероблених заповнювачів. Багато досліджень стосуються зміцнення налиплих залишків цементно-піщаного розчину. Найбільш розповсюджений метод – карбонізація, яка полягає у витримуванні вторинних заповнювачів в умовах певної вологості, високої концентрації CO<sub>2</sub> і тиску. Зазвичай шар старого розчину на щебені містить велику кількість гідроксиду кальцію, гідрату силікату кальцію, еtringіту та моносульфату кальцію, які можуть мати реакцію карбонізації з CO<sub>2</sub> за присутності води. Під час прискореної карбонізації заповнювач зазвичай поміщають у камеру, заповнену CO<sub>2</sub>, і обробляють під тиском протягом кількох днів.

У роботі [16] вторинний заповнювач бетону, попередньо замочений у вапняній

воді, обробляли прискороною карбонізацією протягом 24 годин за тиску 0,30 МПа. Зразки бетону готували шляхом заміщення природного щебеня вторинним карбонізованим заповнювачем у кількості від 0 до 100 %.

Випробування на міцність за стиску у віці 7 і 28 днів показали, що міцність поступово знижувалася разом із коефіцієнтом заміщення, але показники обробленого щебеню завжди були вищими, ніж у необробленого. Міцність за стиску зразків із 100 % заміною на необроблений рециклінговий щебінь знизилася до 33,8 МПа від початкових 40,8 МПа, у той час як 100 % заміна на карбонізований щебінь знизилася до 38,1 МПа.

На кінцеві властивості заповнювачів і бетону сильно впливають умови обробки – час карбонізації, концентрація  $\text{CO}_2$ , вологість повітря, тиск. У дослідженні [10] узагальнено вплив кожного із цих факторів. Показано, що чим довший час карбонізації, тим повніша реакція карбонізації та кращі властивості щебеню. У разі витримування протягом від 0,5 год до 72 год ступінь карбонізації становив від 17,65 %, до 40,6 %. Ефективність карбонізації зростає повільно, коли концентрація  $\text{CO}_2$  змінюється від 40 до 60 %, але оптимальне значення може бути отримане і за менших концентрацій.

Окрім концентрації  $\text{CO}_2$ , тиск також постає важливим фактором, що впливає на ефективність карбонізації. Виявлено, що поглинання  $\text{CO}_2$  суттєво зростає за тиску 0–0,01 МПа і незначно зростає в діапазоні 0,01–0,5 МПа. Хоча збільшення тиску газу спричинить те, що  $\text{CO}_2$  швидше проникне в пори та мікротріщини заповнювача для реакції карбонізації, пори та мікротріщини можуть розширюватися та поширюватися, коли тиск буде занадто високим, тому не рекомендується застосовувати занадто високий тиск у вакуумній камері для карбонізації.

Міцність на стиск бетону на карбонізованих заповнювачах збільшується приблизно на 9,6 % порівняно з міцністю бетону на необробленому щебені. Крім того, виміряна міцність на стиск бетону на

карбонізованих заповнювачах лише приблизно на 3,49 % нижча, ніж для бетону на природному щебені.

Зміцнити прилиплий цементно-піщаний розчин можна шляхом просочування його шару різними речовинами. В експериментальному дослідженні [8] наведено метод поліпшення властивостей крупних рециркульованих заповнювачів шляхом зміни структури поверхні за рахунок поєднання двох різних методів обробки поверхні. У цьому дослідженні вторинний щебінь спочатку обробляють шляхом замочування в соляній кислоті концентрації 0,5 моль/л, а потім їх просочують розчином метасилікату кальцію. Результати дослідження показують, що ефект від комбінації цих двох методів обробки поверхні корисний, оскільки після обробки щільність частинок, водопоглинання та механічна міцність вторинного щебеню значно поліпшуються.

Введення обробленого заповнювача в бетон сприяє одержанню механічної міцності, яка наближається до міцності бетону, приготовленого з натуральними заповнювачами, і перевершує міцність бетону, приготованого з необробленим щебнем.

У дослідженні [9] три типи перероблених заповнювачів були оброблені проникними матеріалами (розчином силікату натрію, силановою суспензією та розчином полівінілового спирту), і їх водопоглинання та індекс дроблення порівнювали до та після модифікації.

Результати експериментів показали, що водопоглинання вторинного крупного заповнювача, замоченого в розчині полівінілового спирту, знижується суттєво, досягаючи 64,56 %. Порівняно з необробленим бетоном, рухливість, міцність на стиск, міцність на розколювання та вигин бетону з переробленого заповнювача, приготовленого за допомогою просочення силікату натрію та силану, збільшуються на 9,8, 26,53, 21,70 та 14,72 % відповідно.

Після модифікації заповнювача проникними кристалічними матеріалами відбувається хімічна реакція між іонами

кальцію в розчині та модифікованим матеріалом, що зумовлює утворення кристалів C–S–H. Ці кристали заповнюють внутрішні пори та мікротріщини розчину, що перешкоджає утворенню тріщин і зменшує пористість. У результаті цей процес підвищує щільність структури переробленого заповнювача.

Порівняння ефективності методів очищення вторинних заповнювачів від залишків цементно-піщаного розчину виконане у роботах [4; 12; 13]. Кількість залишкового прилиплого розчину в заповнювачах, оброблених кислотними, механічними та термічними методами обробки, становить 2, 5 та 11 % відповідно [12]. Обробка підвищує міцність на стиск бетону, виготовленого з оброблених заповнювачів, і становить понад 95 % від міцності бетону на природних заповнювачах, незалежно від методу обробки.

Серед розчинів соляної, азотної і сірчаної кислот, які застосовувалися в [14] для обробки поверхні вторинного щебеню, найбільш ефективною виявилася сірчана кислота концентрації 0,1 моль/дм<sup>3</sup>. Але згідно з дослідженням [15], карбонізація бачиться найбільш ефективним і можливим методом поліпшення механічних властивостей і довговічності бетону на рециклінгових заповнювачах.

Отже, як свідчить огляд попередніх досліджень, не існує однозначної відповіді щодо встановлення найкращого методу підготовки заповнювачів із переробленого бетону для подальшого використання. Кожен із них має певні недоліки, такі як досягнення високої температури за термічної обробки або ймовірність корозії арматури в подальшому, якщо кислота не повністю буде видалена з частинок щебеню. Карбонізація вимагає відповідного складного устаткування для створення підвищеного тиску. Механічна обробка виявляється менш трудомісткою, екологічно чистою та економічною порівняно з методом кислотної обробки, нагрівання або просочення іншими речовинами.

Наше дослідження спрямоване на визначення властивостей бетону, який

містить вторинні заповнювачі після механічного очищення та просочення.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи стало оцінення міцності за стиску бетонних зразків із використанням заповнювачів, отриманих із відходів залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети поставлено такі завдання: отримати крупний заповнювач шляхом подрібнення і розсіювання відходів шпал; здійснити механічне очищення частинок щебеню від залишків цементно-піщаного розчину; просочити частинки щебеню із залишками цементно-піщаного розчину; визначити міцність бетону із заповнювачем кожного виду.

**Виклад матеріалу.** Частини зруйнованих залізобетонних залізничних шпал, які складаються із декількох зерен щебеню із залишками цементно-піщаного розчину, завантажували у шоківу дробарку для попереднього подрібнення до фракцій 10–20 мм. Механічне очищення отриманого щебеню здійснювали у барабанному млині протягом 30 хвилин. Іншу частину щебеню після дробарки поміщали у розчин силікату натрію і витримували протягом години, після чого висушували за температури 40 °C протягом години. Склад бетону розраховували згідно з ДСТУ Б В.2.7-215:2009 [3], міцність і середню густину зразків визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [2] і ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [1].

Для зразків серії 1 використовували необроблений вторинний щебінь, для серії 2 – вторинний щебінь, просочений силікатом натрію, для серії 3 – вторинний щебінь після механічного очищення в барабанному млині, для серії 4 – природний щебінь. Для серій зразків-кубів бетону після витримки у нормальних умовах протягом 7 та 28 діб визначали середню густину та міцність на стиск. Результати наведені на рисунках 1 і 2.

Як показано на рисунках 1 та 2, всі зразки бетону демонструють однакову тенденцію розвитку середньої густини і міцності на стиск, за якої ці параметри збільшуються з терміном твердіння. Однак уведення необробленого вторинного щебеню (серія 1) помітно впливає на

міцність бетону на стиск і його середню густину. Результати показують, що бетон, виготовлений із використанням необробленого щебеню, має нижчу міцність на стиск (10,4 і 19,2 МПа), ніж контрольний бетон на природному заповнювачі (24 і 32,2 МПа) в обидва терміни випробувань.

Через 7 днів твердіння міцність бетону на вторинному щебені, просоченому силікатом натрію (серія 2), була на 10 % вища, ніж у бетону на необробленому щебені, а міцність бетону на механічно очищеному вторинному щебені (серія 3) перевищила у 2,3 раза бетон серії 1 на рециклінговому щебені. Через 28 днів міцність на стиск бетону з обробленим силікатом натрію і механічно очищеним щебенем становила 68 та 98 %, відповідно, від контрольного бетону на натуральному заповнювачі (серія 4).

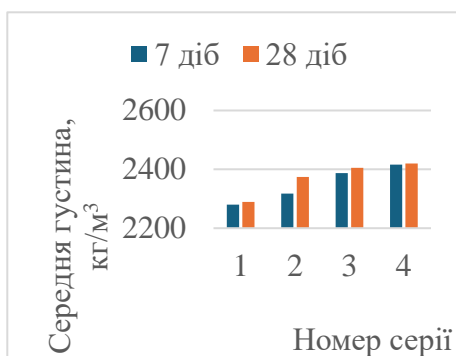


Рис. 1. Середня густина зразків серій бетону

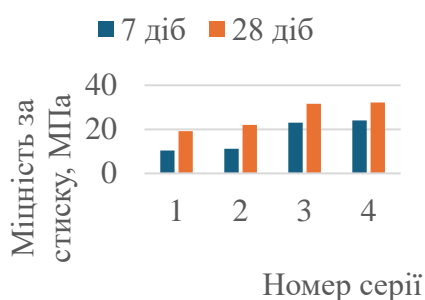


Рис. 2. Міцність на стиск зразків серій бетону

У цілому результати, отримані в ході цього дослідження, показали, що включення 100 % крупного заповнювача із необробленого щебеню в бетонні суміші дає несприятливі результати з погляду міцності на стиск та середньої густини. Фактори, що викликають негативні зміни, можуть бути описані таким чином. Прилиплий розчин до

частинок щебеню зумовлює більш низьку якість порівняно з природними заповнювачами. Тріщини і пухкі залишкові частинки розчину на поверхні частинок щебеню перешкоджають міцнішим зв'язкам між ним і новим цементним тістом, створюючи тим самим слабкі зв'язки під час додавання цього типу заповнювача в бетонну суміш.

Тим часом за введення механічно обробленого або просоченого щебеню в бетон спостерігаються зворотні результати. Підвищення міцності на стиск та середньої густини можна пояснити так. Видалення слабких і пухких частинок розчину з поверхні щебеню або їх просочення силікатом натрію значно поліпшує фізико-механічні властивості бетону на вторинних заповнювачах. Крім того, поліпшення якості поверхні забезпечує більш міцний поверхневий контакт міжфазної зони між цементним тістом і заповнювачем, що важливо для збільшення міцності бетону.

Модифікація поверхні рециркульованого заповнювача, яка відбувається після просочення його розчином силікату натрію, значно зменшує кількість пор і поглинальні характеристики щебеню. Гель С-S-H, що утворюється в результаті реакції силікату натрію з продуктом гідратації цементу  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в новому розчині, поліпшує структуру пор і заповнює поверхневі мікротріщини. Гель С-S-H має ті ж властивості матеріалу, що і бетон, і може зчеплюватися з новим розчином, не відшаровуючи просочення.

Отже, всі ці ефекти сприяють зміцненню зв'язку між поверхнею заповнювача та цементною матрицею, тим самим поліпшуючи механічну міцність бетону.

## Висновки

У результаті експериментального дослідження бетонних зразків із вторинним щебенем, отриманим із подрібнених відходів залізобетонних шпал, встановлено таке. Як механічне очищення від залишків старого цементно-піщаного розчину, так і просочення цього шару розчином силікату натрію поліпшують фізико-механічні

властивості бетону порівняно з бетоном на необробленому заповнювачі. Міцність на стиск бетону, виготовленого з необробленого щебеню, втричі менша, ніж на природних заповнювачах. Механічна обробка підвищує міцність на стиск і становить 98 % від міцності бетону на натуральних заповнювачах. Просочення силікатом натрію незначно збільшує міцність бетону порівняно з міцністю на необробленому заповнювачі на 7-му добу, але дозволяє досягти 68 % міцності порівняно з бетоном на чистих

заповнювачах на 28-му добу.

Отже, обидва способи обробки рециклінгових крупних заповнювачів можна застосовувати для отримання бетонів відповідної міцності. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення оптимальних режимів механічного видалення залишків цементно-піщаного розчину. Також буде проведено оптимізацію параметрів просочення, а саме концентрації розчину і часу витримки, з метою підвищення міцності бетону на такому заповнювачі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний від 2009-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 38 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 18 с.
4. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
5. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6 (018). С. 111–117. URL: [doi:10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013](https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013).
6. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону. *Збірник наукових праць УкрДВЗТ*. 2023. Вип. 206. С. 121–128. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>.
7. Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N., Ménard Y. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*. 2014. Vol. 126. Pp. 90–98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.009>
8. Ismail S., Ramli M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. Pp. 726–739. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.058>
9. Li P., Gan W., Yao G., Huang Q., Zhao R. Effect of Permeable Crystalline Materials on the Mechanical and Porosity Property of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2023. Vol. 16 (13). Pp. 4596. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16134596>
10. 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. *Mater. Express*. 2021. Vol. 11. Pp. 1439–1452. URL: [doi:10.1166/mex.2021.2045](https://doi.org/10.1166/mex.2021.2045).
11. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaidis D., Petrou M. F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 2871. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15082871>
12. Pandurangan K., Dayanithy A., Om Prakash S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 120. Pp. 212–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.093>
13. Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K., Bołtryk M., Jiménez J. R., Fernández J. M. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12. Pp. 0367. URL: [doi:10.3390/ma12030367](https://doi.org/10.3390/ma12030367)
14. Saravanakumar P., Abhiram K., Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. Pp. 611–617. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>
15. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – a review. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112, part 1. Pp. 466–472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>



16. Wu J., Ding Y., Xu P., Zhang M., Guo M., Guo S. Effects of carbonated recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete and the micro-properties of the interfacial transition zone. *Ceramics-Silikáty*. 2022. Vol. 66 (1). Pp. 113–127. URL: [doi:10.13168/cs.2022.0006](https://doi.org/10.13168/cs.2022.0006)

17. Yunusa M., Zhang X., Cui P., Tian X. Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials*. 2022. Vol. 15 (16). Pp. 57–92. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15165792>

## REFERENCES

1. *DSTU B V.2.7-170:2008. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia serednoi hustyny, volohosti, vodopohlynnania, porystosti i vodonepronykhnosti* [DSTU B V.2.7-170:2008. Building materials. Concretes. Methods of determining the average density, humidity, water absorption, porosity and waterproofness]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2009, 38 p. (in Ukrainian).

2. *DSTU B V.2.7-214:2009. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy* [DSTU B V.2.7-214:2009. Building materials. Concrete. Methods of determination of strength according to control samples]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2010, 43 p. (in Ukrainian).

3. *DSTU B V.2.7-215:2009. Building materials. Concretes. Rules of composition selection* [DSTU B V.2.7-215:2009. Building materials. Concretes. Rules of composition selection]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2010, 18 p. (in Ukrainian).

4. *Natsionalna stratehiia upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku, skhvalena rozporядzhennyam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 8 lystopada 2017 r. № 820-r.* [National waste management strategy in Ukraine until 2030 approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 8, 2017 no. 820]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>. (in Ukrainian).

5. Savytskyi M.V. and Smyrnov A.S. *Osoblyvosti vykorystannia podribnenoho betonnoho brukhtu v yakosti krupnogo zapovniuvacha dlia betonu* [Peculiarities of using crushed concrete scrap as a coarse aggregate for concrete]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6 (018), pp. 111–117. (in Ukrainian).

6. Trykoz L.V., Zinchenko O.S., Nykytynskyi A.V. and Romanenko O.V. *Otsiniuvannia hranulometrychnoho skladu vtorynnykh zapovniuvachiv, otrymanykh iz vidkhodiv betonu* [Particle-size distribution assessment of the recycled aggregates from concrete remains]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT* [Collection of Scientific Works of UkrDUZT]. 2023, vol. 206, pp. 121–128. (in Ukrainian).

7. Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N. and Ménard Y. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*. 2014, vol. 126, pp. 90–98.

8. Ismail S. and Ramli M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 68, pp. 726–739.

9. Li P., Gan W., Yao G., Huang Q. and Zhao R. Effect of Permeable Crystalline Materials on the Mechanical and Porosity Property of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2023, vol. 16 (13), pp. 4596.

10. Liu K., Xu W., Sun D., Tang J., Wang A. and Chen D. Carbonation of recycled aggregate and its effect on properties of recycled aggregate concrete : a review. *Mater. Express*. 2021, vol. 11, pp. 1439–1452.

11. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaidis D. and Petrou M.F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022, vol. 15, pp. 2871.

12. Pandurangan K., Dayanithy A. and Om Prakash S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 120, pp. 212–221.

13. Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K., Bołtryk M., Jiménez J.R. and Fernández J.M. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2019, vol. 12, pp. 0367.

14. Saravanakumar P., Abhiram K. and Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 111, pp. 611–617.

15. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L. and Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – a review. *Journal of Cleaner Production*. 2016, vol. 112, p. 1, pp. 466–472.

16. Wu J., Ding Y., Xu P., Zhang M., Guo M. and Guo S. Effects of carbonated recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete and the micro-properties of the interfacial transition zone. *Ceramics-Silikáty*. 2022, vol. 66 (1), pp. 113–127.

17. Yunusa M., Zhang X., Cui P. and Tian X. Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials*. 2022, vol. 15 (16), pp. 57–92.

Надійшла до редакції: 30.03.2024.