

Д. А. Франчук, Ю. С. Бікс

ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ МАТЕРІАЛІВ У ФОРТИФІКАЦІЙНОМУ БУДІВНИЦТВІ: ПОТЕНЦІАЛ ПЕРЕРОБЛЕНИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ І ФІБРОБЕТОНУ

Анотація. Проаналізовано перспективи застосування вторинних матеріалів у бетонних елементах захисних і фортифікаційних споруд. Розглянуто перероблені заповнювачі з будівельних відходів, мінеральні промислові побічні продукти та фіброве армування як напрями для зменшення споживання первинної сировини й підвищення ресурсної ефективності. Узагальнено ключові обмеження: неоднорідність вторинної сировини, підвищене водопоглинання окремих перероблених заповнювачів, можливі коливання міцності й довговічності, а також потреба в контролі складу. Запропоновано послідовність оцінювання матеріалів перед застосуванням у відповідальних конструкціях: сортування, лабораторна характеристика, підбір складу, випробування на міцність і довговічність та перевірка відповідності проєктним вимогам. Підкреслено, що екологічні переваги не можуть бути підставою для зниження вимог до безпеки.

Ключові слова: вторинні матеріали, будівельні відходи, перероблені заповнювачі, фібробетон, фортифікаційні споруди, міцність, довговічність, ефективність використання.

Abstract. The prospects for using secondary materials in concrete elements for protective and fortification structures are analyzed. Recycled aggregates derived from construction waste, mineral industrial by-products, and fiber reinforcement are examined as approaches to reducing the consumption of virgin raw materials and enhancing resource efficiency. Key limitations are summarized, including the heterogeneity of secondary raw materials, the high water absorption of certain recycled aggregates, potential variations in strength and durability, and the necessity for composition control. A sequence for evaluating materials prior to their use in critical structures is proposed: classification, laboratory characterization, mix design, strength and durability testing, and verification of compliance with design requirements. It is emphasized that environmental benefits cannot serve as a justification for lowering safety requirements.

Keywords: secondary materials, construction waste, recycled aggregates, fiber-reinforced concrete, fortification structures, strength, durability, efficiency of use.

Вступ

Потреба у швидкому спорудженні та відновленні захисної інфраструктури підсилює інтерес до матеріалів, які можна отримувати з доступної місцевої сировини, зменшуючи використання первинних ресурсів і обсяги відходів для захоронення. Водночас фортифікаційні споруди належать до конструкцій, для яких неприйнятне неконтрольоване погіршення міцності, довговічності або передбачуваності поведінки матеріалу є неприйнятним. Тому використання вторинних компонентів потребує не декларативного екологічного обґрунтування, а системи технічної перевірки.

Огляд досліджень геополімерного бетону з переробленими заповнювачами показує, що будівельні відходи можуть розглядатися як часткова або повна заміна традиційних заповнювачів у певних сумішах. Водночас автори зазначають, що додавання перероблених заповнювачів може підвищувати водопоглинання та сорбційну здатність матеріалу [1, 2]. Це означає, що доцільність застосування вторинної сировини залежить від її походження, якості підготовки, частки заміщення та вимог до конкретного елемента.

Основна частина

До потенційних вторинних компонентів належать подрібнений бетон і цегла, відсортовані мінеральні фракції, окремі промислові побічні продукти, а також волокнисті компоненти, придатність яких підтверджена для конкретного типу композиту. Ці матеріали не є взаємозамінними. Перероблений бетонний заповнювач може містити залишки цементного каменю й мати іншу пористість, ніж природний щебінь; цегляний бій зазвичай відрізняється водопоглинанням і міцністю; промислові мінеральні компоненти потребують перевірки хімічного складу, стабільності та на наявність потенційно небезпечних домішок.

Першим етапом має бути організація керованого потоку сировини. Будівельні відходи потрібно розділяти за походженням і типом матеріалу, видаляти сторонні вclusions, забезпечувати контроль гранулометричного складу та документувати партії. Змішування різнорідних відходів без сортування унеможливорює достовірне прогнозування властивостей кінцевої суміші. Для застосування у відповідальних конструкціях слід виключати матеріали невідомого походження або з непідтвердженим хімічним складом.

Другий етап — лабораторна характеристика. Для заповнювачів визначають гранулометричний

склад, щільність, водопоглинання, вміст пилюватих і дрібних частинок та інші показники, передбачені відповідними стандартами. Для мінеральних добавок важливі хімічний склад, стабільність властивостей і сумісність із в'язучим. Відповідно до результатів випробувань коригують водовміст, спосіб попереднього зволоження та частку заміщення природного заповнювача. Рецептуру не можна переносити з одного виду відходів на інший без перевірки.

Третій етап передбачає підбір складу та випробування контрольних зразків. Порівнювати потрібно не лише міцність на стиск, а й міцність на розтяг при згині, модуль пружності, усадку, водопроникність, морозостійкість і стійкість до відповідного експлуатаційного середовища. Набір показників визначається призначенням елемента та нормативними вимогами. Якщо матеріал планується для конструкцій, що сприймають особливі динамічні впливи, потрібні окремі розрахунки та випробування; результати звичайних кубикових випробувань не доводять стійкості до вибухового або ударного навантаження.

Перспективним напрямом є поєднання контрольованих вторинних заповнювачів із фібровим армуванням. Фібри можуть обмежувати розвиток тріщин і впливати на характер руйнування композиту, однак ефект залежить від матеріалу, геометрії, дозування, дисперсності та якості потенціал мікроармування для підвищення ударної міцності [4, 5]. Проте фібра не усуває автоматично ризиків, пов'язаних із пористістю вторинних заповнювачів, слабкими зонами, недостатнім ущільненням або дефектами армування.

Екологічна й економічна оцінка має враховувати весь ланцюг постачання: збирання відходів, сортування, подрібнення, очищення, транспортування, додаткові витрати води чи в'язучого, контроль якості та можливий вплив на термін служби. Заміна первинного заповнювача вторинним не обов'язково означає менший сумарний вплив, якщо підготовка матеріалу потребує значних ресурсів або конструкція має коротший строк служби. Тому для порівняння варіантів доцільно використовувати показники на одиницю функціонально еквівалентного виробу, а не лише на тонну суміші.

Для фортифікаційних споруд необхідно розрізняти допоміжні та основні елементи. Вторинні матеріали можуть розглядатися в різних компонентах конструкції лише після перевірки відповідності їхніх властивостей вимогам конкретного елемента. Для несучих і захисних частин потрібні підтверджені характеристики, контроль виробництва, простежуваність партій і задокументовані результати випробувань. У разі відсутності достатніх даних матеріал слід вважати перспективним об'єктом дослідження, а не готовою заміною традиційного компонента.

Висновки

Використання вторинних матеріалів у фортифікаційному будівництві може зменшити потребу в первинній сировині та сприяти раціональному поводженню з будівельними відходами. Однак властивості перероблених заповнювачів істотно залежать від їхнього походження й підготовки, а їх застосування може змінювати водопоглинання, міцність і довговічність бетону. Для обґрунтованого впровадження потрібна послідовна процедура: сортування та паспортизація сировини, лабораторна характеристика, підбір складу, випробування міцнісних і експлуатаційних показників, а також оцінка витрат і екологічного ефекту протягом життєвого циклу. Використання фібри може бути додатковим засобом керування тріщиноутворенням, але не замінює комплексного розрахунку й перевірки конструкції. Ключовим критерієм залишається підтверджена безпека та відповідність матеріалу призначенню споруди.

Список використаних джерел:

1. Blessen Skariah Thomas, Jian Yang, A. Bahurudeen et al. Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 3. Article 100056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100056>
2. Королько С., Левковський О., Саницький М., Кропивницька Т. Захисні укриття з підвищеною ударною міцністю на основі фібробетонів нового покоління. *Військово-технічний збірник*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.176-184>
3. EN 12620:2002+A1:2008. Aggregates for concrete. European Committee for Standardization.
4. EN 206:2013+A2:2021. Concrete — Specification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization.
5. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization.

Франчук Дмитро Анатолійович – студент групи 1Б-266 Вінницького національного технічного університету, e-mail: andrey.engineer@gmail.com.

Бікс Юрій Семенович – к.т.н., доцент, доцент кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, електронна адреса: biks@vntu.edu.ua

Franchuk Dmytro – student of group 1B-26b at Vinnytsia National Technical University, e-mail: repected.2510@gmail.com.

Biks Yuriy – PhD, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: biks@vntu.edu.ua