

УДК 666.972.2:691.32 + 628.5

БЕТОНИ З БІОВУГІЛЛЯМ ДЛЯ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА

О. Мазурак¹, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0001-7846-2799

А. Мазурак¹, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0001-7367-774X

У. Марущак², д. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-3451-7521

А. Регуш¹, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0003-1427-4515

Т. Мазурак¹, к. т. н.

ORCID ID: 0009-0000-8789-3224

Р. Мазурак¹, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0001-8369-6258

¹Львівський національний університет природокористування

²Національний університет «Львівська політехніка»

<https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.043>

Мазурак О., Мазурак А., Марущак У., Регуш А., Мазурак Т., Мазурак Р. Бетони з біовугіллям для сталого будівництва

Добавки біовугілля (БВ) у бетони мають високий потенціал використання, як завдяки екологічності, так і завдяки їхнім покращеним властивостям. Висвітлено аспекти використання різних біовугільних добавок у складі бетонів, охарактеризовано методи виробництва біовугілля та вплив різних факторів на якість біовугільних матеріалів. Представлено фізико-хімічні властивості біобетонів, їхній склад, властивості та проблеми, пов'язані з традиційними методами виробництва. До переваг біовугілля у бетонах відносять здатність бути потенційними поглиначами карбону та заміником в'язучого, а також покращення показників міцності, експлуатаційних характеристик довговічності. Розглянуто процес формування бетонів, концентруючись на процесах утворення бетонної матриці з біовугіллям. Проаналізовано методологію введення біовугілля до бетонної матриці, критерії вибору вихідної сировини, протоколи змішування компонентів та процедури контролю якісних характеристик кінцевого продукту. Розглянуто процеси гідратації та структуроутворення цементного каменю з біокомпонентом. Наведено приклади досліджень бетонів з біовугільною складовою, умови їх тверднення та будівельно-технічні властивості одержаних біобетонів. Особливу увагу приділено оцінці екологічних аспектів застосування «зелених бетонів» з біовугіллям на основі біовідходів рослинного походження, включно з їхнім екологічним профілем, економічною обґрунтованістю, аналізом життєвого циклу, а також реальним потенціалом зниження емісії парникових газів. Огляд також охоплює наявні проблеми, прогнозовані напрямки розвитку та потенційні сфери для майбутніх науково-дослідних робіт у контексті складових біовугільних бетонів. Наведено систему сертифікування біобетонів SCS за європейським стандартом ЕВС. Представлений комплексний аналіз забезпечує детальне розуміння властивостей, технології виробництва та екологічної значущості біовугільних цементних композитів та бетонних систем, слугуючи орієнтиром для подальшого прогресу в галузі екологічного матеріалознавства, будівництва та розвитку циркулярної економіки.

Ключові слова: біовугілля, цемент, бетон, міцність, біовідходи, будівництво.

Mazurak O., Mazurak A., Marushchak U., Rehush A., Mazurak T., Mazurak R. Concretes with biocharol for sustainable construction

Biochar (BC) additives in concrete have a high potential for use, both due to their environmental friendliness and their improved properties. The review highlights the aspects of using various biochar additives in concrete, characterizes biochar production methods and the influence of multiple factors on the quality of biochar materials. The physicochemical properties of bioconcretes, their composition, properties and problems associated with traditional production methods are presented. The advantages of biochar in concrete include the ability to be potential carbon absorbers and a binder substitute, as well as improving strength indicators, operational characteristics (durability, thermal insulation properties, fire resistance and frost resistance). This scientific work considers the process of forming concrete, focusing on the processes of forming a concrete matrix with biochar. The study analyzes the methodology for introducing biochar into the concrete matrix, criteria for selecting raw materials, component mixing protocols and procedures for controlling the quality characteristics of the final product. The processes of hydration and structure formation of cement stone with a biocomponent are considered. Examples of research on concrete compositions with a biochar component, their hardening conditions and construction and technical properties of the resulting bioconcretes are given. Particular attention is paid to the assessment of environmental aspects of the

use of "green concretes" with biochar based on biowaste of plant origin, including their environmental profile, economic feasibility, life cycle analysis, as well as the real potential for reducing greenhouse gas emissions. The review also covers existing problems, predicted development directions and potential areas for future research in the context of biochar concrete components. The SCS bioconcrete certification system, according to the European standard EWC, is given. The presented comprehensive analysis provides a detailed understanding of the properties, production technology and environmental significance of biochar cement composites and concrete systems, serving as a guideline for further progress in the field of ecological materials science, construction and the development of the circular economy.

Keywords: biochar, cement, concrete, strength, biowaste, construction.

Постановка проблеми. Значні обсяги емісії вуглекислого газу цементною індустрією є суттєвою перешкодою на шляху досягнення довгострокового сталого розвитку та формування сприятливого соціального середовища. Застосування біовугілля (БВ) для створення стійких цементних композитів з доданою економічною вартістю та відповідними експлуатаційними характеристиками останнім часом викликають значний інтерес дослідницької спільноти [5, с. 02859; 6, с. 111959; 23, с. 87; 28, с. 100456; 32, с. 143136]. У даному огляді проводиться аналіз факторів, що визначають фізико-хімічні властивості матеріалів з біовугіллям на основі різних органічних біовідходів, методів оптимізації їхніх складів для прогнозування і покращання експлуатаційних властивостей нових біокомпозиційних матеріалів та їхніх еколого-економічних показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом матеріалів, транспортуванням та будівництвом, а також утилізацією після закінчення терміну служби, – чинники, які все більше звертають на себе глобальну увагу останні десятиріччя. Дослідження впродовж останніх років у галузі будівельного матеріалознавства свідчать про зростаюче інтегрування біовугільних композитів у будівельні матеріали [10, с. 8; 15, с. 822; 16 с. 112; 25, с. 5345; 30, с. 124074].

Біовугілля (БВ), одержане шляхом піролізу біомаси, позиціонується як вуглецево-негативний матеріал, що відіграє ключову роль у зменшенні глобальних вуглецевих викидів [9, с. 273; 13; 17, с. 175], згідно із стратегіями Європейського зеленого курсу (European Green Deal).

Застосування біовугілля, виготовленого із сільськогосподарських відходів, у будівництві є стійким рішенням, що не завдає шкоди довкіллю. Воно ефективно виконує роль в'язучого компонента та наповнювача, покращуючи ключові властивості будівельних матеріалів: механічну міцність, реологічні характеристики, здатність до водопоглинання, теплоізоляцію, хімічну стабільність та екологічну безпеку [11, с. 784; 21, с. 65].

Розгляд біовугілля як добавки до цементних розчинів (бетонів), його потенціал для поліпшення якості бетону в різних будівельних застосуваннях на сьогодні набирає чималої важливості. Дослідження [8, с. 442; 19, с. 570; 21, с. 65; 47, с. 103348] показують, що оптимальне додавання біовугілля в межах 1–3 %, або ж до 5 % демонструє найкращі результати. Окрім того, використання біовугілля як важливого елемента в будівельній індустрії є економічно обґрунтованим та екологічно корисним, адже сприяє скороченню викидів CO₂ та дає глибоке розуміння можливостей його використання.

Постановка завдання. Наше завдання – критичне оцінювання досліджень впливу введення різних видів біовугілля до складу різноманітних цементних композитів та бетонів, вивчення закономірностей їх гідратації та структуроутворення, потенційних сфер застосування для розробки більш ефективних та економічно вигідних технологій та повної реалізації потенціалу нових біоматеріалів для будівництва за мінімізації екологічного впливу їх виробництва.

Виклад основного матеріалу.

Вплив сировини на біовуглецеві добавки до цементів та бетонів. Для забезпечення високоякісного розвитку цементної промисловості останніми роками активно досліджуються та впроваджуються різні методи боротьби з викидами вуглецю, зокрема його вловлювання, переробка без втрат основних експлуатаційних властивостей цементних систем та бетонів. Серед можливих рішень особливу увагу привертає розробка стійких цементних матеріалів із низьким вмістом вуглецю як заміна традиційному цементу [2, с. 145; 5, с. 4442; 33, с. 53; 37]. Ефективність використання таких матеріалів, як подрібнена зола-винесення, десульфурований гіпс та гранітна дрібна фракція, для зменшення екологічного впливу цементних композицій підтверджується численними дослідженнями [35, с. 62; 33, с. 53]. Однак широке застосування цих альтернатив стримується їхніми певними недоліками. Так, використання золи-ви-

несення лише частково вирішує проблему викидів, тоді як біовугілля має потенціал для досягнення навіть негативного вуглецевого сліду [31, с. 60790; 35, с. 62; 49, с. 4]. У зв'язку з цим, стимулювання використання біовугілля у цементній галузі стає ключовим для досягнення вуглецевої нейтральності [3, с. 102433].

Виробництво біовугілля є гнучким процесом, що дозволяє використовувати широкий спектр органічної сировини. Теоретично, будь-яка органічна речовина може бути перетворена на біовугілля. Доступні та економічно вигідні джерела охоплюють різноманітні відходи, які класифікують як за походженням, так і за іншими ознаками [6, с. 111959; 45]. Найбільшу групу біовідходів утворюють сільськогосподарські відходи та злаки [5, с. 4440; 40, с. 101271; 35, с. 18; 43, с. e01721], горіхова шкаралупа та ін. [8, с. 440; 20, с. 812; 38, с. 105204]. Другу групу утворюють лісогос-

подарські відходи (тирса та деревина [16, с. 115; 32, с. 143136]. Третя група – міські відходи, що містять значний відсоток органічних харчових залишків [6, с. 111959; 17, с. 173] та осад стічних вод [42, с. 990]. Ще одна група – це органічні відходи тварин. Зупинімося детальніше на перших двох групах відходів органічного (природного) походження для одержання так званих зелених бетонів.

Встановлено, що хоча співвідношення целюлози, геміцелюлози та лігніну в рослинній та деревній сировині не впливає на ступінь ароматичної конденсації твердого залишку після високотемпературного піролізу, ці компоненти визначають структурні особливості утвореної ароматичної системи [1, с. 104099; 2, с. 145; 13, 15, с. 125213]. Крім цього, вміст ароматичного карбону, як позитивного індикатора стабільності біовугілля, прямо пропорційний вмісту лігніну в сировині (рис. 1).

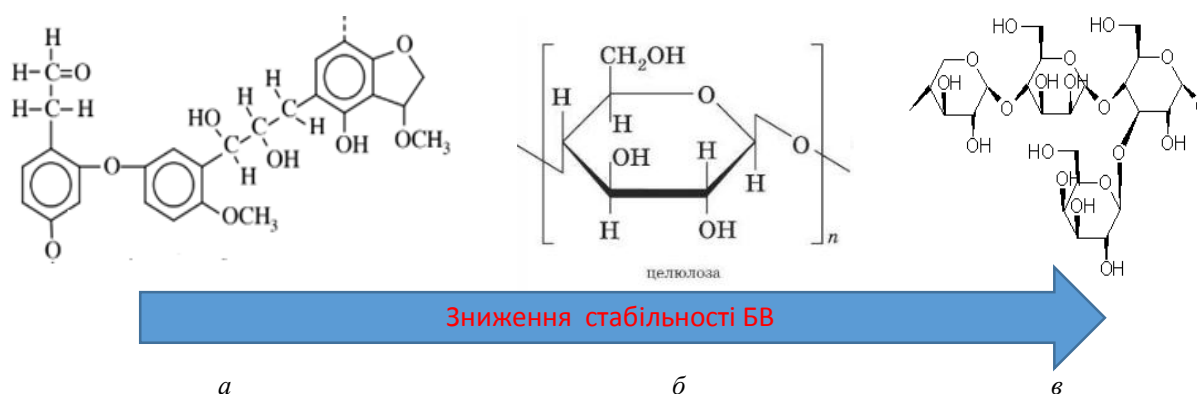


Рис. 1. Зміна стабільності БВ від природи речовин: лігніну (а), целюлози (б) та геміцелюлози (в)

Дослідження також показують, що стабільність біовугілля залежить від вихідного матеріалу та зменшується в такому порядку: лігнін > целюлоза > геміцелюлоза, що пояснюється кристалічністю вуглецевої структури та організацією мікропор [6, с. 111959; 52, с. 59].

Встановлено [49, с. 30; 50, с. 100595], що завдяки вищій стабільності БВ, введення додатків біовугілля в бетон знижує ймовірність побічних негативних реакцій, зокрема, корозії хлорид- та сульфат-іонами, вилугування, поряд з іншими технологіями [48, с. 4171]. Використання БВ як заміника цементу вигідніше порівняно з іншими альтернативами (зола, кремнезем, шлак), оскільки більшою мірою сприяє декарбонізації та відповідає концепції сталого розвитку.

Технології одержання біовугілля. Умови проведення піролізу є ключовим фактором, що визначає фізико-хімічні властивості біовугілля [50,

с. 100595]. Для його виробництва застосовують низку технологій, серед яких найбільш поширеними є піроліз [2, с. 145; 49, с. 20], газифікація [12, с. 109785; 51, с. 133003], торефікація та гідротермальна карбонізація, котрі мають переваги і недоліки, що проявляються залежно від умов. Варто підкреслити, що навіть при використанні одного й того ж методу піролізу, зміна таких параметрів, як температура, швидкість нагріву та тривалість процесу, призводить до отримання біовугілля з різними фізико-хімічними властивостями [50, с. 100595]. Для покращення ефективності піролізу є різні конструкції реакторів, зокрема реактори з нерухомим та киплячим шаром та для термоформування, обертові печі, трубчасті апарати та мікрохвильові установки, котрі забезпечують однорідність та необхідну швидкість нагріву сировини за час піролізу [4, с. 96].

Розширення сфери застосування біовугілля передбачає різні підходи до його активації. Серед них – попередня обробка сировини, з якої отримують БВ, його безпосередня активація, а також використання спільного піролізу біомаси з іншими матеріалами, такими як пластикові відходи, фосфогіпс та вугілля [39, с. 134274; 41, с. 129535]. Важливо відзначити, що вихідна сировина та вже вироблене БВ можуть проходити попередню обробку або активацію із застосуванням фізичних, хімічних, вуглецевих або біологічних методів. Це призводить до зміни фізико-хімічних характеристик БВ, включно з площею його поверхні, наявністю функціональних груп, структурою пор та рівнем рН, що підвищує його ефективність і екологічну значущість під час використання в цементних композитах [42, с. 1000; 44].

Фізико-хімічні властивості бетонів з біовугіллям. Дослідження показало, що біовугілля має хімічний склад, подібний до цементу, в межах потрібної фазової діаграми Al–Si–Ca, як і інші альтернативні цементні матеріали [4, с. 93; 53, с. 22]. Це відкриває нові перспективи для використання біовугілля у виробництві цементу та застосування у бетонах.

Хімічний склад біовугілля, основу якого становить карбон із домішками кисню, водню, нітрогену та інших елементів біомаси, впливає на його реакційність, поживність та сорбційні властивості. Функціональні групи на поверхні біовугілля (гідроксильні, карбоксильні, фенольні) покращують утримання речовин та хімічні реакції. Властивості біовугілля, зокрема площа поверхні, рН, катіонообмінна здатність, щільність та елементний склад, визначаються процесом виробництва, сировиною та умовами піролізу [46, с. 120678; 49, с. 3].

Унікальні фізико-хімічні властивості БВ покращують характеристики цементних композитів, зокрема підвищують міцність на стиск за рахунок гідратації та заповнення пор. Висока питома поверхня БВ покращує зчеплення та стійкість до розтріскування, збільшуючи їх міцність на розтяг [18, с. 397].

Основні експлуатаційні властивості біоцементних композитів. Результати багатьох досліджень свідчать про те, що оптимальна частка заміни цементу біовугіллям для збільшення міцності на стиск і розтяг становить 1–2 % за масою. Крім того, додавання біовугілля може підвищити опірність біовугільно-цементних композитів до сульфатної емісії, корозії, спричиненої хлоридами, усадкових явищ та проникнення рідин

[2, с. 145; 22, с. 3559]. Необхідно зазначити, що біовугілля здатне змінювати водонепроникність бетону, хоча суттєвої залежності від температури піролізу для цієї властивості біовугілля не спостерігали [43, с. e01721; 49, с. 27].

Позитивний вплив біовугілля (до 5 % маси) на покращення довговічності пояснюється більш інтенсивною гідратацією та заповненням пор, що сприяє утворенню щільнішої внутрішньої структури, яка ускладнює проникнення води та іонів, збільшуючи водонепроникність [28, с. 138219; 44].

Відомо, що крихкість цементної матриці бетонних конструкцій спричиняє високий ризик розтріскування в результаті робочого навантаження, усадки, температурних коливань, або погіршення навколишнього середовища. Деформації усадки пов'язані з вищою швидкістю випаровування води [47, с. 103348; 49, с. 30], більшою кількістю дефектів пор, каналів для виходу з цементної матриці води.

Також БВ як наповнювач бетону оптимізує пористу структуру, прискорює карбонізацію цементних композитів [46, с. 120678; 27, с. 138219], зменшуючи теплопровідність матеріалу через руйнування міжфазних перехідних зон, споживання енергії на нагрівання та охолодження та покращуючи його теплоізоляційні характеристики [6, с. 11]. За рахунок пор зменшуються внутрішні структурні пошкодження бетону та знижується тиск, накопичений у бетоні за високих температур. Пористий БВ також збільшує коефіцієнти звукопоглинання бетонних конструкцій за рахунок поглинання та розсіювання зовнішніх звуків [49, с. 28].

Роль біовугілля у структуроутворенні цементів та бетонів. Науковці [32, с. 143136; 37, с. 37] оптимізували гранулометричний склад складників та цілеспрямовано керували процесами раннього структуроутворення цементуючої матриці шляхом лужно-сульфатного активування ультрадисперсних алюмосилікатів та енергетично-активних кристалічних додатків (нанорозмірних частинок оксидів силіцію), що знижують проникність завдяки утворенню центрів кристалізації новоутворень та як аутогенний засіб для загоєння герметизації тріщин у цементній матриці [27, с. 138219; 45, с. 3]. Внаслідок досліджень на принципах композиційної побудови конструкційних матеріалів нового покоління розроблено лужно-сульфатноактивовані композиційні цементні з високою ранньою міцністю, які охоплюють комплексний аналіз речовинного складу цементів, лужних і сульфатних активаторів та органічних

модифікаторів [33, с. 55]. Науковці довели, що більш щільній цементній мікроструктурі сприяє індукція кристалічних відкладень, що блокують пори, зменшуючи як пористість, так і проникність, але також покращує ефективність самовідновлення композитів цементу з кристалічними додатками (КД) [28, с. 100456; 47, с. 103348; 53, с. 21].

Згідно з дослідженнями [28, с. 100456], завдяки заміні цементу на 2 мас. % біовугілля з відходів деревини (БВД), загальні деформації

усадки композитів БВД-цементу значно зменшуються (рис. 2).

Подібно до автогенної усадки, зразки групи з додатками БВД та КД демонстрували сприятливе зменшення загальних деформацій усадки, котрі були значно нижчими, ніж у зразках лише з лужно активованими цementsами. Протягом семиденного терміну твердіння загальні деформації усадки цих зразків зменшилися на 31,3 % порівняно з контрольними [28, с. 100456].

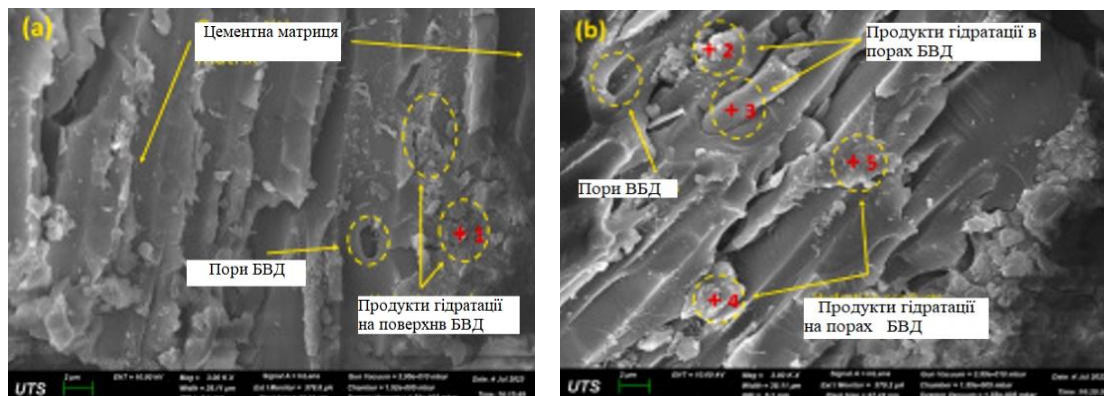


Рис. 2. Мікроструктури зразків цементів з біовугіллям в експерименті з повною усадкою: а – продукти гідратації на поверхні БВД; б – продукти гідратації в порах БВД [28, с. 100456]

Використання біовуглецевих цементів та бетонів. Використання біовугілля для бактеріального самовідновлення бетону (імобілізації бактерій у біовугіллі для загоєння деформацій цементного розчину) стало однією з інноваційних перспективних технологій [5, с. e02859; 17, с. 183], що є ефективною, одночасно сприяючи секвестрації вуглецю. Дослідження поєднання іммобілізованих у біовугіллі бактерій із суперабсорбуючими полімерами [26, с. 49] довели спроможність забезпечувати самовідновлення волокнистого бетону навіть після повторних пошкоджень, що підтверджує підвищення міцності, довговічності та екологічності таких бетонних конструкцій з додатками БВ.

Через неоднорідність та складну будову біовугілля стає важко проводити порівняльний аналіз наявних наукових робіт, присвячених його дослідженню. У багатьох публікаціях відсутня інформація про вид використаної біомаси, параметри процесу піролізу та опис лабораторних методик підготовки біовугілля. Це створює проблему, оскільки сьогодні не існує єдиної думки щодо ключових факторів, які визначають його успішну інтеграцію у бетонні суміші, що призводить до непослідовних результатів та різноманітних висновків.

Сертифікація біобетонів згідно з європейськими стандартами. Для застосування біовугілля у бетонних виробках є можливість сертифікації за європейським стандартом ЕВС у класі ЕВС-BasicMaterial, який відповідає регламенту REACH ЄС, встановлюючи, таким чином, базові вимоги до якості матеріалу [42, с. 1003]. У Німеччині з 2022 року виробники бетону отримують сертифікат CSC, що підтверджує зменшений вуглецевий слід їхньої продукції [45, с. 5]. Ця сертифікація, що охоплює цементну, сировинну та бетонну галузі, передбачає можливість сертифікації CSC за модулем CO₂ на основі оцінки життєвого циклу (LCA), або екологічної декларації продукту (EPD). Однак виробники, які спеціалізуються лише на біовугіллі, не можуть отримати відповідні сертифікати CSC.

Враховуючи низьку ймовірність вилугування важких металів із бетону, стандарт ЕВС-Basic Material передбачає лише декларування їхнього вмісту без встановлення граничних значень. Водночас, щодо органічних забруднювачів, вимагається проведення аналізу на відповідність встановленим нормативам. Продаж біовугілля класу ЕВС-Basic Material іншим компаніям (B2B) можливий за умови виконання ними певних вимог щодо подальшої обробки.

Для застосувань бетону, що виходять за межі європейських стандартів, із вересня 2023 року запроваджено Всесвітній сертифікат біовугілля (WBC), який гарантує стале виробництво матеріалу класу WBC. Інший клас EBC – Consumer Materials – також призначений для застосувань поза ґрунтом, але вирізняється суворішими граничними значеннями щодо поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) для використання в середовищах, що контактують з живими організмами та екосистемами. Клас EBC-Urban застосовують для біовугілля, що використовується у міському озелененні та фільтрації дощової води, з метою запобігання забрудненню водних ресурсів. На відміну від EBC-Basic Material, клас EBC-Consumer Material має більш жорсткі вимоги до вмісту ПАВ EFSA та розширений перелік органічних забруднювачів, що підлягають декларуванню відповідно до специфікацій ЕРА [14].

Різниця між класами сертифікації ґрунтується на принципі «придатності біовугілля для конкретної мети» відповідно до чинних законодавчих, нормативних та галузевих вимог, незалежно від його загальної якості. У найближчому майбутньому очікується подальше розширення класифікації з урахуванням потреб ринку, зокрема шляхом введення спеціалізованих класів для будівельних матеріалів [Wahl, с.].

Висновки. Біовугілля можна отримати із широкого спектра вихідних матеріалів і за різних технологічних процесів. Ключовим є те, що властивості кінцевого біовугілля можна цілеспрямовано змінювати, регулюючи вихідні матеріали, кількість біовугілля у складі цементних композитів або бетонів, параметри технологій виробництва, застосовуючи спеціальні методи для досягнення потрібних функціональних якостей. Це дає змогу створювати біовугілля з характеристиками, точно підібраними для конкретних завдань.

Щодо проблем використання біомаси, отриманої піролізом з аграрних відходів, варто продовжувати практику оптимізування наукових досліджень біовугілля, виготовленого з різних видів біовідходів, розвитку необхідної інфраструктури, а також створювати відповідну законодавчу базу та політику у сфері управління відходами.

Окрім того, розглянуто сучасний стан досліджень і наявні труднощі у галузі біовугільно-цементних композитів. Автори пропонують перспективні напрямки для майбутніх наукових проєктів. Зокрема рекомендується активізувати дослідження, спрямовані на розробку стратегій комерціалізації біочар-технологій для реалізації

секвестрування емісії диоксиду карбону з урахуванням місцевих умов та залученням комп'ютерних для прогнозування експлуатаційних властивостей та проведення аналізу життєвого циклу. Це сприятиме ширшому застосуванню біовугілля у промисловому та будівельному секторах.

Бібліографічний список

1. Abdulkadir et al. A holistic review of nanomaterials in strain-hardening cementitious composites: Insights into micro- and macromechanical, deformation, smart, and durability properties: Review article. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. P. 104099. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104099>
2. Afshar M., Saeed Mofatteh. Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications: review article. *Results in Engineering*. Vol. 23. 2024. P. 102433. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102433>
3. Ahmed A. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on concrete properties: a review. *Discov Civ Eng* 1. 2024. P. 145. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00154-z>
4. Aini N. A., Jamilatun S., Pitoyo J. Pirolisis biomassa: review. *Agroindustrial Technology Journal*. 2022. Vol. 6, № 1. P. 89–101. <https://doi.org/10.21111/atj.v6i1.7559>
5. Barbhuiya S., Das B. B., Kanavaris F. Biochar-concrete: a comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. P. e02859. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>
6. Chen T. et al. Effect of biochar characteristics on freeze-thaw durability of biochar-cement composites. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 102, № 15. P. 111959. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.111959>
7. Cheng W., Liu G, Chen L. Pet fiber reinforced wet-mix shotcrete with walnut shell as replaced aggregate. *Appl Sci*. 2017. Vol. 7, No 4. P. 345.
8. Chomiak K. et al. Optimizing the properties of granular walnut-shell based KOH activated carbons for carbon dioxide adsorption. *J CO₂ Utilization*. 2017. P. 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.02>
9. Churkina G. et al. Buildings as a global carbon sink. *Nat. Sustain*. 2020. Vol. 3. P. 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
10. Courard L. and Parmentier V. Carbonated miscanthus mineralized aggregates for reducing environmental impact of lightweight concrete blocks: research article. *Sust. Build*. 2017. Vol. 2, № 3. 9 p. <https://doi.org/10.1051/sbuild/2017004>
11. Dipta I. et al. Coal-derived char for improving mechanical performance and microstructural characteristics of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2025. Vol. 14, No 4. P. 780–798. <https://doi.org/10.1080/21650373.2025.2465979>
12. Dissanayake P. D. et al. Sustainable gasification biochar as a high efficiency adsorbent for CO₂ capture: a facile method to designer biochar fabrication. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2020. Vol. 124. P. 109785

13. EBC (2012-2022) European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle. Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. URL: <http://www.european-biochar.org> Version 10.1G vom 10. 2022. URL: <http://www.european-biochar.org> (дата звернення: 12.02.2025).
14. European Food Safety Authority, EFSA opinion on suitable indicators for both the occurrence and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food, 2008. URL: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2008.724> (дата звернення 12.02.2025).
15. Fan Yang et al. Stabilization of dissolvable biochar by soil minerals: Release reduction and organo-mineral complexes formation. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125213. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125213>
16. Gunawardene O. Carbon Dioxide Capture through Physical and chemical adsorption using porous carbon materials. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 397. <https://doi.org/10.3390/atmos13030397>
17. Gupta S. et al. Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar. *Cem. Concr. Compos.* 2017. P. 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.012>
18. Gupta S., Kua H., C. Low. Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. *Cement Concr. Compos.* 87. 2018. P. 110–129. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
19. Habert G. et al. Environmental Impact and Decarbonization Strategies in the Cement and Concrete Industry. *Nat Rev Earth Environ.* 2020. Vol. 1. P. 559–573.
20. Hilal N., Mohammed Ali T. K., Tayeh B. A. Properties of environmental concrete that contains crushed walnut shell as partial replacement for aggregates. *Arab J Geosci.* 2020. Vol. 13. P. 812. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05733-9>
21. Huanyu Li. 3 – Biochar for sustainable construction industry. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. *Biochar Towards Sustainable Environment*. 2023. P. 63-95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91873-2.00015-7>
22. Hussain Ch. et al. Short-term analysis on the combined use of sugarcane bagasse ash and rice husk ash as supplementary cementitious material in concrete production. *Environmental science and pollution research*. 2021. Vol. 29. Issue 3. P. 3555–3564. DOI: 10.1007/s11356-021-15877-0
23. Hylton J., Hugen A., Rowland S. M. et al. Relevant biochar characteristics influencing compressive strength of biochar-cement mortars. *Biochar*. 2024. Vol. 6. P. 87. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00375-6>
24. Kadhim S. et al. Development of ternary blend cement-free binder material for construction. 2024. Vol. 28. Issue 12. P. 2807–2820. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2326977>
25. Kaffayatullah Khan et al. Biochar Produced from Saudi Agriculture Waste as a Cement Additive for Improved Mechanical and Durability Properties: SWOT Analysis and Techno-Economic Assessment. *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15 (15). P. 5345. doi: 10.3390/ma15155345.
26. Kua H. W. et al. Biochar-immobilized bacteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles. *Cem. Concr. Compos.* 2019. Vol. 100. Pp. 35–52.
27. Lin X. at al. Biochar-cement concrete toward decarbonisation and sustainability for construction: characteristic, performance and perspective. *J. Clean Prod.* 2023. Vol. 419. P. 138219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138219>
28. Lin X. at al. Effect of crystalline admixtures on shrinkage and alkali-silica reaction of biochar-cementitious composites. *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 18. P. 100456. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100456>
29. Lovecchio N. et al. Agricultural solid waste as source of supplementary cementitious materials in developing countries. *Environ. Sci.* 2020. Vol. 7. P. 13–30. doi: 10.3934/environsci.2020002
30. Maljaee H. et al. Effect of cement partial substitution by waste-based biochar in mortars properties. *Constr. Build. Mater.* 2021. Vol. 301. P. 124074. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124074>
31. Mangi S. A., Ibrahim M. H., Jamaluddin, N. et al. Influence of coal ash on the concrete properties and its performance under sulphate and chloride conditions. *Environ Sci Pollut Res.* 2021. Vol. 28. P. 60787–60797. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15006-x>
32. Marathe S., Sadowski Ł. Developments in biochar incorporated geopolymers and alkali activated materials: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 469. P. 143136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135246>
33. Miller S. A., John V. M., Pacca S. A., Horvath A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cem Concr Res.* 2018. Vol. 114. P. 115–124.
34. Onsongo S. K., Olukuru J., Munyao O. M. et al. The role of agricultural ashes (rice husk ash, coffee husk ash, sugarcane bagasse ash, palm oil fuel ash) in cement production for sustainable development in Africa. *Discov Sustain.* 2025. Vol. 6. P. 62. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00841-6>
35. Osama Z. et al. Utilization of engineered biochar as a binder in carbon negative cement-based composites: a review. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 417. No 23. P. 135246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135246>Get rights and content
36. Sanytsky M. et al. Architectural Self-Compacting Concrete Based on Nano-Modified Cementitious Systems. Proceedings of CEE 2023. CEE 2023. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Vol. 438. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_37
37. Senadheera S. et al. Application of biochar in concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 143. P. 105204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105204>.

38. Shahbazpanahi S., Faraj R. H. Feasibility study on the use of shell sunflower ash and shell pumpkin ash as supplementary cementitious materials in concrete. *J. Bui Eng.* 2020. Vol. 30. P. 101271. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101271>
39. Shang X et al. Production, properties and life cycle assessment of artificial lightweight aggregates produced with corn straw ash (CSA) and concrete slurry waste (CSW). *Constr Build Mater.* 2024. Vol. 411. P. 134274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134274>.
40. Shilar F. A., Ganachari V. S., Patil V. B. Advancement of nano-based construction materials: a review. *Constr Build Mater.* 2022. Vol. 359. P. 129535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129535>
41. Singhal S. Biochar as a cost-effective and eco-friendly substitute for binder in concrete: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering.* 2023. Vol. 27, Issue 2. P. 984–1009. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2068658>
42. Tayeh B. A., Hakamy A. A., Fattouh M. S. The effect of using nano agriculture wastes on microstructure and electrochemical performance of ultra-high-performance fiber reinforced self-compacting concrete under normal and acceleration conditions. *Case Stud Constr Mater.* 2023. Vol. 18. P. e01721. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01721>
43. Thakur A., Agarwal R., Kumar R. et al. Enhancement of Concrete Performance and Sustainability through Partial Cement Replacement with Biochar: An Experimental Study. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.* 2024. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01661-w>
44. Wahl A. Biochar in Concrete & Cement: Application Construction Industry. *Biochar zero.* 2024. URL: <https://biochar-zero.com/construction-industry/biochar-in-concrete/> (дата звернення 12.02.2025)
45. Walling S. A., Provis J. L. Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future? *Chem. Rev.* 2016. Vol. 116. P. 4170–4204.
46. Wang et al. The roles of biochar as green admixture for sediment-based construction products. *Cem. Concr. Compos.* 2019. Vol. 104. P. 103348.
47. Wang L. et al. Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production.* 2020. Vol. 258. P. 120678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120678>
48. Ye P., Guo B., Qin H. et al. The state-of-the-art review on biochar as green additives in cementitious composites: performance, applications, machine learning predictions, and environmental and economic implications. 2025. *Biochar.* Vol. 7, No 21. 30 P. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00423-1>
49. Yu H. et al. Heat of hydration of Portland cement containing coal-derived char at different temperatures. *Results in Materials.* 2024. Vol. 23. P. 100595. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100595>
50. Yueji Bai et al. Gasified olive stone biochar as a green construction fill material. *Construction and Building Materials.* 2023. Vol. 403, No 3. P. 133003. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133003>
51. Zhang Y. Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar.* 2022. Vol. 4. P. 59. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00182-x>
52. Zhihao Zhao et al. Biochar affects compressive strength of Portland cement composites: a meta-analysis. *J. Biochar.* 2024. Vol. 6, No 1. P. 21. DOI: 10.1007/s42773-024-00309-2
53. Marushchak U. et al. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enter-prise Technologies.* 2016. Vol. 6. № 6. P. 50–57.

Стаття надійшла 16.02.2025