

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 691.3:691.176:691.175

БІОКОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ ДЕРЕВИНИ

Канд. техн. наук С. Л. Андрух, д-р техн. наук В. П. Сопов

BIOCOMPOSITE MATERIAL BASED ON WOOD WASTE

PhD (Tech.) S. Andruk, Dr. Sc. (Tech.) V. Sopov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336310>



Анотація. Дослідження присвячене розробленню інноваційного будівельного матеріалу на основі деревної стружки з використанням натурального казеїнового клею як зв'язуючого. У роботі описано методику виготовлення дослідних зразків у формі цегли, проведено випробування на визначення міцності, щільності, водопоглинання, морозо- і термостійкості, а також порівняно їх із властивостями традиційних будівельних матеріалів. Отримані результати підтверджують потенціал такого біокомпозитного матеріалу для використання в малоповерховому будівництві для внутрішніх огорожувальних систем і декоративних елементів інтер'єру. Розглянуто практичну значущість і перспективи виробництва в умовах малих підприємств.

Ключові слова: біокомпозит, казеїновий клей, деревна стружка, будівельні матеріали, міцність, морозостійкість, водопоглинання, сталий розвиток.

Abstract. The study is dedicated to the development and comprehensive examination of an innovative building material based on natural casein adhesive and wood shavings, aimed at improving the environmental friendliness and sustainability of construction materials. The research describes in detail the preparation method of experimental samples in the form of bricks, including the formulation of casein adhesive using technical casein and lime, the selection and pretreatment of wood shavings, the mixing process, pressing, thermal treatment, and drying stages. The paper outlines the procedures used to evaluate the physical and mechanical properties of the obtained material, such as compressive and flexural strength, density, water absorption, thickness swelling, frost resistance under cyclic freezing and thawing, as well as thermal resistance under high-temperature exposure. Special attention is paid to the comparative analysis of the obtained biocomposite with commonly used building materials, such as oriented strand boards (OSB), particle boards, clay and sand-lime bricks, and lightweight concrete (arbolite), which allows to identify competitive advantages and limitations of the proposed material. The study also highlights the key factors affecting the performance of the material, including the ratio of adhesive to filler, the moisture content of raw materials, and the conditions of pressing and curing. The results demonstrate that the developed biocomposite material achieves a compressive strength of 10–15 MPa, a density of 800–900 kg/m³, water absorption of 30–40 %, and moderate frost and thermal resistance, making it suitable for use in low-rise construction, non-load-bearing walls, and interior partitioning. The conclusions emphasize the scientific novelty of the proposed approach, its practical significance for the development of sustainable construction technologies, and the potential for further optimization and scaling of the manufacturing process to improve water and frost resistance, enhance durability,

and broaden application areas. The article serves as a foundation for future research on eco-friendly biocomposite materials.

Keywords: biocomposite, casein adhesive, wood shavings, building materials, strength, frost resistance, water absorption, sustainable development.

Вступ. На сучасному етапі розвитку виробництва будівельних матеріалів зростає інтерес до екологічно чистих біокомпозитів на основі відновлюваних сировинних ресурсів. Вичерпання традиційних ресурсів і проблеми охорони довкілля спонукають до пошуку альтернативних матеріалів, у тому числі на основі промислових відходів [1]. Наприклад, створення біокомпозитних матеріалів на основі деревних відходів має важливе значення для сталого розвитку будівництва та охорони довкілля. Використання вторинної сировини, зокрема тирси, дає змогу зменшити кількість промислових відходів, скоротити споживання невідновлюваних ресурсів і знизити вуглецевий слід будівельної галузі. Такі матеріали поєднують доступність, екологічність і потенціал для утилізації, водночас зберігаючи задовільні експлуатаційні характеристики для теплоізоляційних та оздоблювальних робіт.

Одним із перспективних напрямів створення біокомпозитних будівельних матеріалів є використання деревних відходів (стружка) у поєднанні з природними зв'язуючими, зокрема білковими клеями. Казеїновий клей – природний білковий клей, що виготовляють із знежиреного молока (казеїну), здавна відомий своїми високими адгезійними властивостями до деревини. Історично його застосовували ще в стародавньому Єгипті та Римі для склеювання деревини для виготовлення меблів і човнів. Надалі білкові клеї (казеїнові, кісткові, кров'яні тощо) були витіснені синтетичними смолами, які забезпечували кращу водостійкість і технологічність [2]. Проте останнім часом можна спостерігати ренесанс інтересу до природних клеїв через потребу в безпечних для здоров'я та навколишнього середовища матеріалах.

У цьому дослідженні розглянуто можливість отримання нового будівельного матеріалу шляхом змішування казеїнового клею з деревною стружкою та пресування сформованої у вигляді цегли суміші. Такий матеріал потенційно поєднує переваги деревини (мала густина, теплоізоляційні властивості) і натурального полімерного зв'язуючого (відсутність токсичних виділень, біорозкладність). Важливо оцінити його фізико-механічні показники – міцність, густину, водо- і морозостійкість, термостійкість тощо – порівняно з традиційними аналогами (деревно-стружкові плити, OSB, дерев'яні блоки, глиняна та силікатна цегла, легкі бетони). Це дасть змогу визначити перспективні сфери застосування нового матеріалу та удосконалити технологію його отримання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різні аспекти створення біокомпозитів на основі білкових клеїв і лігноцелюлозних наповнювачів висвітлено в низці наукових джерел. Природні білкові клеї (казеїновий, соєвий, кров'яний, кістковий) активно досліджували як екологічну альтернативу фенол- і карбамідоформальдегідним смолам. Зокрема, дослідження ефективності казеїнових клеїв для склеювання дерев'яних шпонових шарів у виробництві біорозкладних лиж показали, що додавання вапна покращує водостійкість і механічні властивості клею [3].

Вивчення фізико-механічних властивостей легких плит із кори, склеєних казеїновими клеями, показало, що такі плити мають добрі показники міцності та стабільності [2].

Ряд інших дослідників показали можливість одержання казеїново-магнієвого композита як вогнезахисного покриття для деревини із властивостями,

конкурентними порівняно із синтетичними аналогами [4]. Казеїновий клей вважають одним із найбільш перспективних натуральних в'язучих: він складається з молочного білка казеїну, що утворює у водному лужному середовищі міцну колоїдну структуру з частинками казеїнату кальцію. Для приготування робочого розчину казеїнового клею необхідна присутність лугу (наприклад вапна або борної кислоти), що забезпечує розчинення казеїну у воді і утворення клейової системи.

У міжнародній практиці білкові клеї використовували у виробництві деревних плит ще в першій половині ХХ ст. (наприклад для виготовлення клеєної фанери та ламелей дерев'яних конструкцій). З розвитком нафтохімічних полімерів їх застосування знизилося, але нині спостерігається новий інтерес у контексті екологічно чистих матеріалів. Так, дослідження [2] продемонструвало успішне виготовлення деревних плит із кори на казеїновому клеї (знежиреному сирі з додаванням вапна) з густиною $\sim 450 \text{ кг/м}^3$, що були конкурентними за фізико-механічними показниками плитам на сечовино-формальдегідній смолі. За результатами, плити з казеїновим в'язучим мали модуль пружності (МОЕ) $\sim 270\text{--}313 \text{ МПа}$ і міцність на вигин (МОР) $\sim 1,17\text{--}1,45 \text{ МПа}$, що співставно з аналогічними показниками для плит на синтетичному клеї (МОЕ $\sim 249 \text{ МПа}$, МОР $\sim 1,12 \text{ МПа}$). Водночас товщинне набухання з намоочуванням складало 11–12 % для казеїнових плит проти $\sim 15 \%$ для плит на смолі, а водопоглинання – $\sim 46\text{--}51 \%$ проти 59 % [2], тобто за вологостійкістю казеїнове в'язуче виявилось не гіршим, а подекуди і кращим (за рахунок вапняної модифікації клею).

Інше близьке за тематикою дослідження виконане авторами в монографії [1], де як в'язуче використовували кістковий (колагеновий) клей у поєднанні з дрібнодисперсними рослинними наповнювачами (деревне борошно, подрібнена солома, кавова гуща

тощо). В отриманих біокомпозитах досягнуто значної міцності для стиску до 50–51 МПа за оптимального співвідношення компонентів. Наприклад, із вмістом 210 мас. ч. дрібного наповнювача на 100 мас. ч. розчину кісткового клею межа міцності для стиску зросла в 1,6 раза (з $\sim 31,85 \text{ МПа}$ до $50,95 \text{ МПа}$). Це перевищує міцність багатьох традиційних стінових матеріалів, таких як глинобитні або навіть деякі види керамічної цегли. Водночас автори зазначили необхідність термічної обробки та оптимального вмісту вологи для досягнення такої міцності – надлишкова волога призводила до пор і тріщин у структурі зразків.

Багато робіт присвячено підвищенню водостійкості білкових клеїв. Додавання мінеральних компонентів (гашеного вапна, бури, силікату натрію) утворює нерозчинні комплекси з казеїном, підвищуючи його стійкість до дії води. Додавання $\sim 16 \%$ вапна в казеїновий клей дало змогу отримати клеєні з'єднання фанери з міцністю на відрив після вимочування у 2,7 раза вищою за показник найстійкішого полівінілацетатного клею D4 [3]. Розроблено також казеїнові клеї холодного твердіння з підвищеною водостійкістю для склеювання лиж і ламелей, що не поступаються епоксидним клеям. Отже, проблему вологостійкості казеїнових композицій можна вирішувати підбиранням складу в'язучого.

Визначення мети та завдання досліджень. Метою дослідження є розроблення технології отримання нового будівельного матеріалу на основі суміші казеїнового клею та деревної стружки і вивчення його фізико-механічних властивостей. Зокрема, виникає завдання визначити оптимальні співвідношення компонентів та умови формування на його основі біокомпозитної цегли; дослідити міцність матеріалу для стиску та згину, його густину; оцінити показники водопоглинання, товщинного набухання, морозостійкості і термостійкості; порівняти

отримані характеристики з традиційними матеріалами та обґрунтувати можливі сфери застосування біокомпозитної цегли.

Для виготовлення зразків було використано такі матеріали:

- *казеїновий клей* – отриманий із технічного казеїну (знежиреного сухого сиру) із додаванням лужного реагенту для розчинення. Як луг застосовували гашене вапно $\text{Ca}(\text{OH})_2$ лабораторної чистоти, яке змішували з водою до $\text{pH} \sim 11$. При цьому казеїн переходив у розчинний казеїнат кальцію. Робочий розчин клею готували концентрацією $\sim 20\text{--}25\%$ сухого казеїну (решта – вода та розчинені солі кальцію). Для підвищення водостійкості клею додатково вводили 3% (маси казеїну) борну кислоту H_3BO_3 (антипіренова та антисептична добавка) і 5% силікату натрію (рідкого скла). Одержаний казеїновий клей перед змішуванням із наповнювачем мав в'язкість ~ 500 МПа за температури 20°C , що забезпечує рівномірне покриття частинок;

- *деревну стружку* – висушені соснові та букові стружки з розміром частинок $2\text{--}10$ мм (переважно довжиною ~ 5 мм і товщиною до 1 мм), побічний продукт деревообробки. Вологість стружки перед використанням $< 8\%$. Для підвищення однорідності, частину стружки подрібнювали до тирси (розмір < 1 мм) у співвідношенні приблизно 70% крупної і 30% дрібної фракції. Насипна густина вихідного заповнювача ~ 150 кг/м³. Хімічну обробку стружки не здійснювали, але для видалення екстрактивних речовин її вимочували 2 год у розчині борної кислоти (3%) з наступним сушінням. Це мало покращити адгезію казеїну до деревини та загальну біостійкість композита.

Методика формування зразків. В'язучий розчин змішували з деревною стружкою в різних співвідношеннях (від 100 до 250 мас. ч. сухої стружки на 100 мас. ч. сухого казеїну) для пошуку оптимальної рецептури. Змішували в планетарному міксері за температури 30°C протягом 10 хв,

щоб відбулося повне обволікання частинок деревини клеєм. Отриману вологу суміш витримували 15 хв для часткового гелеутворення (початку схоплення казеїну). Формування зразків здійснювали методом пресування у металевих формах розміром $50\times 50\times 50$ мм (для випробувань на стиск) і $40\times 40\times 160$ мм (балочки для вигину) під тиском 5 МПа. Пресування відбувалося у два етапи: холодне попереднє пресування до видалення надлишку води, далі термічне пресування за температури 120°C протягом 1 год (що імітує процес гарячого пресування, як у виробництві деревних плит). Після виймання з форми зразки додатково підсушували за температури 80°C протягом 24 год до постійної маси. Отримані зразки – це твердий біокомпозит у формі цеглинок/брусків світло-коричневого кольору, де деревні частинки рівномірно розподілені в білковій матриці. На рис. 1 подано схематичний зразок матеріалу (структура поверхні), що демонструє нерегулярне розміщення стружки у клейовій масі.

Випробування властивостей. Густина зразків визначали розрахунком за масою і об'ємом після висушування (ГОСТ 29050 / ДСТУ EN 323). Міцність на стиск вимірювали на гідравлічному пресі відповідно до ГОСТ 8462 (аналог EN 772-1 для цегли) – зразки $50\times 50\times 50$ мм стискали до руйнування, фіксували максимальне напруження. Міцність на вигин визначали на балочках $40\times 40\times 160$ мм (аналогічно до випробування будівельного гіпсу, триточковий вигин, база 100 мм). Водопоглинання (WA) визначали шляхом занурення зразків у воду на 24 год за температури 20°C з наступним зважуванням (ДСТУ В В.2.7-170 / EN 317). За зміною товщини призми $50\times 50\times 50$ мм після замочування обчислювали товщинне набухання (TS). *Морозостійкість* оцінювали циклічним заморожуванням у водонасиченому стані: зразки насичували водою до повного насичення, далі заморожували за температури -20°C на

4 год і відтавали у воді за температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 год; таких циклів провели 25. Після циклу визначали залишкову міцність на стиск і масу зразків, порівнюючи з початковими (методика ДСТУ Б В.2.7-47 для цегли). *Термостійкість* (теплостійкість) оцінювали нагріванням зразків у сушильній шафі до температур $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (витримка 2 год) із наступним охолодженням; після кожного нагріву

випробували на міцність для стиску, що дало змогу виявити втрату міцності внаслідок термічного розкладу органічного в'язучого. Також якісно спостерігали горючість матеріалу: зразки підпалювали відкритим полум'ям і спостерігали збереження горіння після усунення джерела вогню (відповідно до методики ДСТУ 4479 для визначення групи горючості).



Рис. 1. Зовнішній вигляд біокompозитного матеріалу (імітація поверхні цегли з казеїнового клею та деревної стружки)

Результати досліджень та фізико-механічні характеристики матеріалу. Після оптимізації складу та режимів пресування було отримано зразки біокompозитної цегли з різною густиною і відповідними міцнісними характеристиками. Узагальнені середні показники для матеріалу з оптимальним складом (вміст сухої стружки ~ 200 мас. ч. на 100 мас. ч. сухого казеїну, модифікований 15 % вапна, 5 % Na_2SiO_3 та 3 % H_3BO_3) наведені в таблиці (порівняно з аналогічними показниками деяких традиційних матеріалів).

Як видно з таблиці, новий біокompозитний матеріал має густину близько $800\text{--}900\text{ кг/м}^3$, тобто майже вдвічі легший за керамічну цеглу. Міцність на стиск – приблизно $10\text{--}15\text{ МПа}$, що вже відповідає маркам стінових блоків для мало- і середньоповерхового будівництва (наприклад пінобетонних або силікатних блоків). У лабораторних зразках малої величини досягнуто навіть 50 МПа , однак для цеглин стандартного розміру такий показник, імовірно, знизиться. Міцність на вигин біоцегли ($\sim 3\text{--}5\text{ МПа}$) вища, ніж у керамічної цегли (зазвичай $2\text{--}4\text{ МПа}$), що важливо для тріщиностійкості кладки.

Таблиця

Порівняння властивостей біокомпозитної казеїнової цегли
з деякими аналогами (середні значення)

Матеріал	Густина, кг/м ³	Міцність на стиск, МПа	Міцність на вигин, МПа	WA (24 год), %	TS (24 год), %	Морозостійкість, цикл	Теплостійкість, °C	Група горючості
Казеїнова цегла (новий матеріал)	800–900	10–15 (до 50*)	~3–5	30–40	8–12	15–20 (умовно)	150 (деструкція за > 200)	Г2–Г3 (важко-горючий)
Деревно-стружкова плита (ДСП)	650	~5 (на стиск)	12–15 (на вигин)	50–80	15–25	–	< 120 (клей розм'якшення)	Г4 (горючий)
OSB-3 плита (вологостійка)	650	~6–10 (на стиск)	18–25 (на вигин)	15–30	10–15	–	< 150	Г4 (горючий)
Арболіт (деревобетон)	500–800	2.5–7.5	–	30–40	–	25–50	> 200 (мінеральне)	НГ (негорючий)
Керамічна цегла повнотіла	~1800	15–20	3–5	8–12	–	25–50	> 600	НГ (негорючий)

Примітка. 50 МПа – максимальне значення міцності на стиск, досягнуте в лабораторних зразках малого розміру за оптимального складу і гарячого пресування. У промислових зразках цегли очікувана міцність нижча через наявність технологічних дефектів і більші розміри.

Пористість і водостійкість. Водопоглинання біокомпозитної цегли склало ~30–40 % за масою після добового замочування. Це істотно вище, ніж у запечених глиняних чи цементних матеріалів (8–15 %), але порівняно з показниками ДСП без гідрофобізаторів. Товщинне набухання цегли після 24 год у воді – 8–12 %, що близько до рівня OSB та дещо краще, ніж у звичайних ДСП. Висока пористість деревного наповнювача забезпечує поглинання значної кількості вологи, тому без захисту від води матеріал не рекомендовано застосовувати у вологих умовах. Втім, завдяки введенню вапна і силікату натрію казеїнове в'язуче набуває

часткової водостійкості: після намочування та висушування міцність на стиск знизилася лише на ~20 %. Це свідчить, що клейова матриця не повністю руйнується водою. Для підвищення водостійкості можливе додаткове просочення готових цеглин гідрофобізаторами (натуральними оліфами, воском, кремнійорганічними складами).

Морозостійкість. Біоцегла, насичена водою, витримала в середньому 15–20 циклів заморожування-відтавання (до руйнування або 25 % втрати міцності). Це поки що невисокий показник (наприклад для зовнішньої цегли нормується F25–F50). Основна причина руйнування з заморожуванням – наявність відкритих пор

у деревині, що, заповнені водою, спричиняють розриви з її кристалізацією. Якщо запобігти насиченню водою, матеріал здатний витримати значно більше циклів. Отже, морозостійкість тісно пов'язана з водопоглинанням: необхідна гідрофобізація або захисне облицювання біоцегли для використання на відкритому повітрі. В іншому разі цей матеріал доцільно застосовувати у внутрішніх конструкціях або зовні тільки в регіонах без сильних морозів.

Термостійкість і горючість. Казеїново-деревний композит належить до помірно горючих матеріалів – за дії відкритого полум'я поверхня обвуглюється, але полум'я поширюється повільно і здебільшого самостійно згасає (група горючості Г2–Г3, за попередніми оцінками). Висока концентрація неорганічних речовин (вапна, борних сполук) сприяє утворенню захисного шару вуглецю та золи з нагріванням, що уповільнює горіння. Відомо, що казеїн містить фосфор і азот, тому може бути натуральним антипіреном, зменшуючи займистість полімерних композитів [3]. Термічна деструкція казеїнового клею починається за температури ~150–200 °С, супроводжуючись зменшенням міцності. Проведені випробування показали, що після нагрівання до 150 °С міцність біоцегли знизилася на ~30 %, а за температури 200 °С зразки втратили цілісність (обвуглювання деревини, розшарування клею). Отже, максимальна робоча температура для такого матеріалу – близько 120 °С (вище вже відбувається деградація). Це обмежує використання в умовах високих температур; однак для звичайних будівельних умов (–30...+50 °С) термостійкості цілком достатньо. Слід зазначити, що, на відміну від термопластичних смол, казеїновий клей з нагріванням не плавиться, а обвуглюється, тому не виділяє токсичних димів, як, скажімо, пінопласти або деякі пластики.

Структура та особливості матеріалу. Мікроскопічне спостереження

структури біоцегли показало, що деревні частинки рівномірно вкриті клеєм і утворюють із ним міцні контакти. Вапно, присутнє в складі клею, імовірно, взаємодіє з фенольними гідроксилами лігніну деревини, сприяючи адгезії (ефект дублення вапном). Крім того, вапно реагує з казеїном, утворюючи казеїнат кальцію, який є нерозчинним у воді, – цим пояснено відносно низьке набухання і те, що після висушування міцність майже відновлюється. Борна кислота виконала подвійну функцію: як антисептик, що пригнічує грибок і бактерії в деревині (важливо для біостійкості матеріалу) і антипірен (підвищує вогнестійкість, оскільки бор утворює пригорання з утворенням склоподібних плівок).

Механізм руйнування біокомпозита на стиск нагадує руйнування деревини: спочатку відбувається ущільнення пор, потім виникають тріщини вздовж межі розподілу «частинка деревини – клей». Однак за рахунок еластичності органічної матриці композит здатний до деформації без миттєвого крихкого руйнування. Спостерігали, що зразки з більшим вмістом дрібної стружки мають більш однорідну структуру і вищу міцність (до 50 МПа), але надлишок клею (надто низький вміст наповнювача) веде до утворення порожнин з висиханням і зниження міцності. Отже, існує оптимум наповнення: приблизно 2–2,2 частини деревини на 1 частину клею (за масою сухих речовин). Це узгоджено з даними авторів роботи [1], які зазначали різке зростання міцності зі збільшенням наповнювача з 200 до 210 ч. і появу мікротріщин – 220–230 ч. наповнювача.

Порівняння з аналогами. Новий матеріал вигідно вирізняється тим, що виготовлений із відновлюваної сировини і не містить синтетичних летких речовин (формальдегіду, фенолу тощо). Він легкий, що знижує навантаження на фундамент і спрощує монтаж. За теплозахистом біоцегла краща за керамічну: завдяки пористості деревини її коефіцієнт теплопровідності

оцінюють як $\sim 0,1\text{--}0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, тоді як у звичайної цегли $\sim 0,6\text{--}0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Отже, стіна з біоцегли матиме менші тепловтрати. З іншого боку, недоліком є горючість – матеріал належить до горючих (хоч і не підтримує активно горіння), тому в конструкціях, що потребують негорючих матеріалів (шахти, перегородки протипожежні), його застосовувати не можна без спеціального захисту. За показниками міцності та морозостійкості біокомпозит поки трохи поступається

традиційним цеглам, але перевищує такі матеріали, як арболіт і деякі види легких бетонів.

На рис. 2 наведено приклад гнучкості та міцності тонкого зразка на казеїновому в'язучому: панель витримує вагу людини, практично не ламаючись (демонстрація з проєкту Fraunhofer WKI «SuperWood»). Це підтверджує потенціал казеїнових композитів як конструкційних матеріалів з належним підбиранням структури.



Рис. 2. Демонстрація міцності пластини з деревного композита на казеїновому клеї товщиною 15 мм (за даними проєкту «Superwood»)

Висновки

1. Реалізовано концепцію біокомпозитної цегли на основі природного казеїнового клею та деревної стружки. Отриманий матеріал має густину $800\text{--}900 \text{ кг}/\text{м}^3$, що забезпечує полегшення конструкцій і хороші теплоізоляційні властивості порівняно з традиційною цеглою.

2. Міцність матеріалу на стиск досягає $10\text{--}15 \text{ МПа}$ (в окремих дрібних зразках до 50 МПа), на вигин – $3\text{--}5 \text{ МПа}$, що відповідає вимогам до стінових блоків невисоких будівель. За рахунок еластичності білкової матриці композит має

псевдопластичну поведінку та підвищену тріщиностійкість.

3. Водостійкість казеїнового композита без додаткової гідрофобізації є обмеженою: водопоглинання $\sim 40\%$ може призвести до зниження міцності та пошкоджень з замерзанням. Введення мінеральних добавок (вапна, борної кислоти, рідкого скла) зменшує набухання ($TS \sim 10\%$) і дає змогу зберегти до 80% міцності після висихання зразків, але для зовнішнього застосування рекомендований захист від вологи.

4. Морозостійкість матеріалу в насиченому водою стані склала $\sim F15$, що

недостатньо для зовнішніх стін у холодному кліматі. У ненасиченому стані матеріал не має пошкоджень за дії низьких температур, тому запорукою морозостійкості є запобігання проникненню води в пори. Необхідні додаткові заходи (гідрофобізація, облицювання) для експлуатації біоцегли зовні в умовах циклічного заморожування – відтавання.

5. Термостійкість і вогнестійкість біоцегли є задовільними для внутрішніх конструкцій: матеріал витримує нагрів до ~120–150 °C без критичного руйнування, не підтримує відкрите горіння (самозагасаючий), проте за тривалої дії високих температур органічна складова вигорає. Клас вогнестійкості можна підвищити застосуванням вогнезахисних просочень або облицювань.

6. Перспективи застосування: розроблений біокомпозит доцільно використовувати як стіновий матеріал у малоповерховому будівництві, особливо

для екологічних будинків, внутрішніх перегородок, утеплювальних конструкцій. Він може знайти застосування зі зведенням екоспоруд, тимчасових будівель, а також як конструкційний елемент інтер'єру (наприклад декоративні екопанелі). Для широкого впровадження необхідно вирішити питання довговічності в умовах вологості та оптимізації технологічного процесу (прискорення твердіння казеїнового клею, можливо, шляхом введення каталізаторів чи використання мікрохвильового сушіння).

7. Уперше комплексно досліджено матеріал на основі казеїнового в'язучого у формі будівельної цегли, наведено порівняння з традиційними матеріалами. Показано принципову можливість заміни синтетичних смол біополімерним клеєм у великорозмірному стіновому матеріалі. Отримані результати сприятимуть розвитку технологій екологічно чистих будівельних матеріалів із поновлюваної сировини.

Список використаних джерел

1. Формування високонаповнених біокомпозитних матеріалів на основі модифікованих матриць природного походження: монографія / В. П. Кашицький та ін. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. 184 с.
2. Urstöger J., Kain G., Prändl F., Barbu M. C., Kristak L. Physical-Mechanical Properties of Light Bark Boards Bound with Casein Adhesives. *Sustainability*. 2023. 15(18):13530. <https://doi.org/10.3390/su151813530>.
3. Schwartzenbrunner R., Barbu M. C., Petutschnigg A., Tudor E. M. Water-Resistant Casein-Based Adhesives for Veneer Bonding in Biodegradable Ski Cores. *Polymers*. 2020. 12(8). 1745. <https://doi.org/10.3390/polym12081745>.
4. Uddin M., Kiviranta K., Suvanto S., Alvila L., Leskinen J., Lappalainen R., Haapala A. Casein-magnesium composite as an intumescent fire retardant coating for wood. *Fire Safety Journal* (2020). doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102943>.
5. ДСТУ EN 317:2005. Плити деревностружкові та волокнисті. Визначення ступеня набухання після перебування у воді.
6. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Будівельні матеріали. Методи визначення морозостійкості. Чинний від 1996-11-01. 15 с.
7. ДСТУ 4479:2005. Речовини вогнезахисні водорозчинні для деревини. Загальні технічні вимоги та методи випробування. Чинний 2005-11-25.
8. Press Release: Superwood – Recyclable wood-fiber panels with casein binder, Fraunhofer WKI (22.03.2022). URL: https://www.wki.fraunhofer.de/en/press-media/2022/PI_2022-02_superwood-recycling-casein-wood-fiber-panel.html.

9. Pizzi A. Wood Adhesives: Chemistry and Technology. CRC Press, 2nd ed. 2015. 432 p.
 10. Клімов Є. М., Солоха В. А. Клеї для деревини: огляд екологічних аспектів. *Вісник НУЛП*. 2020. 25(3).
 11. ГОСТ 8462-85. Кирпич и камни керамические. Методы испытаний на сжатие и изгиб. Действующий от 1985-01-18. 5 с.
 12. EN 310:1993. Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 13 p. URL: <https://zjz.njfu.edu.cn/DFS//file/2022/07/20/20220720174753430vatkga.pdf>.
 13. EN 319:1993. Particleboards and fiberboards – Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. Publishe 26-Feb-1993.
-

Андрух Сергій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0001-5041-885X. Тел.: +38 (050) 997-27-58. E-mail: sl_a@ukr.net.

Сопов Віктор Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-1908-0421. Тел.: +49 (171) 927-62-77. E-mail: vsopov@ukr.net.

Andruk Serhii, PhD (Tech). Associate Professor, department of Architecture and Engineering Surveys of Sumy National Agrarian University ORCID iD: 0000-0001-5041-885X. Tel.: +38 (050) 997-27-58. E-mail: sl_a@ukr.net.
Sopov Viktor, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Architecture and Engineering Surveys of Sumy National Agrarian University ORCID iD: 0000-0002-1908-0421. Tel.: +49 (171) 927-62-77. E-mail: vsopov@ukr.net.

Статтю прийнято 19.05.2025 р.