

УДК 620.17:624.011.1

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.128.1250

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ДЕРЕВОЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПАНЕЛІ ПЕРЕКРИТТЯ

НИКІФОРОВА Т. Д.¹, докт. техн. наук, проф.,
ФЕДІН В. А.^{2*}, асп.

¹ Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: t.d.nikiforova@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0688-2759>

^{2*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 882-28-08, e-mail: fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8829-7520>

Анотація. Постановка проблеми. Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується активним пошуком конструктивних рішень, що поєднують високі експлуатаційні показники з підвищеною екологічною ефективністю. Одним із перспективних напрямів є використання перехресно-клеєної деревини (ПКД) у складі композитних систем перекриття. Такі конструкції забезпечують зменшення маси будівель, зниження вуглецевого сліду та ефективне використання відновлюваних ресурсів. Водночас для підвищення жорсткості та несучої здатності дерев'яні елементи доцільно поєднувати з бетонним шаром, формуючи деревобетонні композитні конструкції. Додатковим напрямом підвищення екологічності таких систем є застосування рециклінгових матеріалів у складі бетону, зокрема крупних заповнювачів, отриманих шляхом переробки будівельних відходів. Попри потенціал цього підходу, експериментальні дані щодо роботи композитних конструкцій з перехресно-клеєної деревини та бетону на рециклінговому заповнювачі залишаються обмеженими, що обумовлює необхідність проведення відповідних досліджень. **Мета статті.** Метою роботи є експериментальне дослідження несучої здатності деревозалізобетонної композитної панелі перекриття на основі плити з перехресно-клеєної деревини та бетонного шару з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження при роботі на згин. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було розроблено дослідний зразок композитної панелі перекриття, що складається з плити з перехресно-клеєної деревини товщиною 90 мм та монолітного бетонного шару товщиною 50 мм на рециклінговому крупному заповнювачі. Спільна робота шарів забезпечувалася системою Г-подібних анкерних елементів, встановлених у масив деревини. Перед виготовленням композитної конструкції проведено експериментальне визначення фізико-механічних характеристик рециклінгового бетону шляхом випробування стандартних кубів і призм на стиск та визначення модуля пружності. Після набору міцності бетонного шару виконано випробування композитної панелі на згин за стандартною методикою. У процесі випробувань фіксувалися значення навантаження, прогинів та характер руйнування конструкції. **Висновки.** За результатами експериментальних досліджень встановлено, що рециклінговий бетон, використаний у складі композитної панелі, відповідає класу міцності C32/40. Руйнівне навантаження дослідженої деревозалізобетонної панелі перекриття становило 52 кН, що перевищує відповідний показник аналогічної плити з перехресно-клеєної деревини без бетонного шару приблизно на 15 %. Отримані результати підтверджують ефективність використання композитної системи на основі перехресно-клеєної деревини та бетону з рециклінговим заповнювачем для підвищення несучої здатності перекриття. Проведені дослідження створюють передумови для подальшого чисельного моделювання напружено-деформованого стану таких конструкцій і розширення практики використання екологічно орієнтованих композитних систем у сучасному будівництві.

Ключові слова: перехресно-клеєна деревина; дерево-бетонні композитні конструкції; рециклінговий бетон; композитні перекриття; експериментальні дослідження; несуча здатність

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BENDING STRENGTH OF A TIMBER CONCRETE COMPOSITE FLOOR PANEL

NIKIFOROVA T.D.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
FEDIN V.A.^{2*}, Postgrad. Stud.

¹ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine,

tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: t.d.nikiforova@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0688-2759>

^{2*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 882-28-08, e-mail: fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8829-7520>

Abstract. Problem statement. The modern development of the construction industry is characterized by an active search for structural solutions that combine high performance with improved environmental efficiency. One of the promising directions is the use of cross-laminated timber (CLT) in composite floor systems. Such structures ensure a reduction in the weight of buildings, a decrease in the carbon footprint, and efficient use of renewable resources. At the same time, in order to increase stiffness and load-bearing capacity, timber elements are advisable to combine with a concrete layer, forming timber–concrete composite structures. An additional approach to improving the environmental performance of such systems is the use of recycled materials in concrete mixtures, particularly coarse aggregates obtained from the processing of construction waste. Despite the potential of this approach, experimental data on the performance of composite structures made of cross-laminated timber and concrete with recycled aggregates remain limited, which necessitates further research. **Purpose of the article.** The aim of this study is the experimental investigation of the load-bearing capacity of a timber–reinforced concrete composite floor panel based on a cross-laminated timber slab and a concrete layer with recycled coarse aggregate under bending. **Methodology.** To achieve the stated objective, an experimental specimen of a composite floor panel was developed, consisting of a 90 mm thick cross-laminated timber slab and a 50 mm thick monolithic concrete layer made with recycled coarse aggregate. Composite action between the layers was ensured by a system of L-shaped anchor elements installed in the timber body. Prior to manufacturing the composite structure, the physical and mechanical properties of the recycled concrete were experimentally determined by testing standard cubes and prisms in compression and by evaluating the modulus of elasticity. After the concrete layer had reached the required strength, the composite panel was tested in bending according to a standard testing procedure. During the tests, the applied loads, deflections, and the failure pattern of the structure were recorded. **Conclusions.** The results of the experimental study showed that the recycled concrete used in the composite panel corresponds to strength class C32/40. The ultimate load of the investigated timber–reinforced concrete floor panel reached 52 kN, which exceeds the corresponding value of a similar cross-laminated timber slab without a concrete layer by approximately 15 %. The obtained results confirm the effectiveness of using a composite system based on cross-laminated timber and concrete with recycled aggregate to increase the load-bearing capacity of floor structures. The conducted research creates a basis for further numerical modeling of the stress–strain state of such structures and for expanding the practical application of environmentally oriented composite systems in modern construction.

Keywords: *cross-laminated timber; timber–concrete composite structures; recycled concrete; composite floor systems; experimental studies; load-bearing capacity*

Постановка проблеми, мета і задачі дослідження. Сучасні вектори розвитку будівельної галузі демонструють стійку тенденцію до впровадження екологічно безпечних систем, базовим компонентом яких переважно виступає деревина або композитні матеріали на її основі. Виразним прикладом конструктивних рішень, що задовольняють жорсткі критерії екологічності, є застосування перехресно-клеєної деревини (ПКД). Зазначений матеріал широко застосовується у будівництві різного функціонального призначення, зокрема і в багатоповерхових будівлях [1; 2]. ПКД є інженерним деревинним матеріалом, що складається з непарної кількості шарів дощок, склеєних між собою з взаємно перпендикулярною орієнтацією волокон, зазвичай від трьох до дев'яти шарів. Така структура забезпечує підвищену просторову жорсткість і

стабільність елементів. Крім того, властивості ПКД можуть бути оптимізовані шляхом комбінування деревини різних порід або класів міцності у складі окремих шарів [3]. Поряд із цим, значної актуальності набуває проектування деревобетонних композитних конструкцій. Ефективність таких систем зумовлена синергетичною взаємодією матеріалів: дерев'яний компонент сприяє зниженню маси та мінімізації сумарного вуглецевого сліду [4], тоді як бетонна частина забезпечує суттєве підвищення несучої здатності та жорсткості системи.

При розгляді композитних конструкцій на основі перехресно-клеєної деревини (ПКД) у поєднанні з бетонним шаром актуалізується проблема використання матеріалів, що не повністю відповідають сучасним вимогам екологічної сталості. Зокрема, традиційні бетонні суміші

характеризуються значними енерговитратами [5] під час виробництва та суттєвими викидами вуглекислого газу, що негативно впливає на загальний екологічний баланс будівельної конструкції. У зв'язку з цим одним із перспективних напрямів підвищення екологічності деревобетонних композитів є застосування вторинних або рециклінгових матеріалів у складі бетонної суміші, де використання переробленого крупного заповнювача, отриманого з відходів будівельної індустрії, може сприяти зменшенню споживання природних ресурсів та скороченню обсягів будівельних відходів.

Попри значний потенціал такого підходу, дослідження, присвячені вивченню механічної поведінки бетонів із рециклінговими заповнювачами у складі композитних систем із деревиною, наразі залишаються обмеженими. У більшості випадків вони мають локальний характер і проводяться в межах окремих наукових груп або експериментальних проєктів [6; 7]. Через це відсутня достатня кількість узагальнених експериментальних даних, які б дозволили повною мірою оцінити вплив вторинних заповнювачів на міцнісні, деформаційні та довговічнісні характеристики композитних дерево-бетонних елементів. Особливої уваги потребує аналіз взаємодії між шаром бетону з рециклінговим заповнювачем та елементами з ПКД у зоні контактного з'єднання, оскільки саме ця область визначає ефективність передачі зусиль між матеріалами та рівень спільної роботи компонентів композитної системи.

Враховуючи вище наведене було розроблено і випробувано конструкцію на основі ПКД панелі з бетонним шаром.

Метою даного дослідження є експериментальне дослідження несної здатності деревозалізобетонної панелі перекриття при роботі на згин.

Матеріали та методи досліджень. Для проведення досліджень було прийнято деревозалізобетонну панель перекриття, що складається з двох шарів: 1 (нижній) – плита з перехресно-клеєної деревини; 2 (верхній) – плита з бетону на крупному заповнювачі рециклінгового походження.

Плита з перехресно-клеєної деревини (ПКД) виробництва компанії CLT-Result, виготовлена з пиломатеріалів сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.). За конфігурацією плита складається з трьох шарів, кожен з яких має товщину 30 мм. Таким чином, загальна товщина елемента становить 90 мм. Відповідно до даних виробника, застосована деревина характеризується класом міцності не нижче T10 та C16 згідно з вимогами стандартів ДСТУ EN 14080:2013 та ДСТУ EN 338:2022 [8; 9]. Для склеювання шарів використано поліуретановий клей типу I-PUR.

Плита з бетону на крупному заповнювачі рециклінгового походження (РЗБ) виконана монолітною по верхній площині ПКД і має товщину 50 мм. Для проєктування складу важкого бетону з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження застосовувався розрахунково-експериментальний метод, який покладений в основу національних стандартів ДСТУ Б В.2.7-215:2009 та ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. З урахуванням особливостей рециклінгового крупного заповнювача [10] було застосовано удосконалений традиційний розрахунково-експериментальний метод шляхом застосування додаткових поправок на походження рециклінгового крупного заповнювача до коефіцієнтів якості заповнювачів та водопотреби бетонної суміші [11]. По всій площі плити було встановлено арматурну сітку з дроту Ø1 мм, розташовану на відстані 15 мм від поверхні ПКД плити.

Спільна робота плит з РЗБ та ПКД за допомогою Г-подібних анкерів діаметром Ø5 мм, які покривались клеєм *Rolax paint factory D3 Premium* та закручувались в масив деревини у попередньо висвердлені отвори глибиною 30 мм. Загальна довжина анкера становила 60 мм, довжина гака – 20 мм. Анкерне поле формувалося з кроком 250 мм у поздовжньому напрямку з відступом по 125 мм від поперечних граней, а також з кроком 230 мм у поперечному напрямку з відступом 70 мм від поздовжніх граней.

Ширина дослідного зразка деревозалізобетонної панелі перекриття становила 600 мм, довжина – 2000 мм, товщина – 140 мм. Загальна схема деревозалізобетонної панелі перекриття для експериментальних досліджень наведена на рисунку 1.

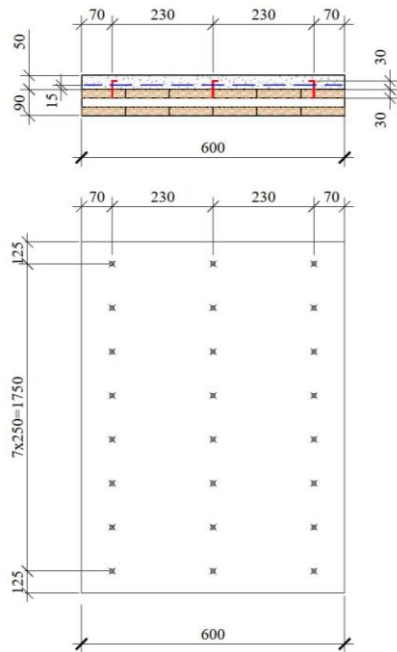


Рис. 1. Загальна схема деревозалізобетонної панелі перекриття для експериментальних досліджень

Перед виготовленням композитної конструкції ПКД з РЗБ було проведено експериментальне визначення фізико-механічних характеристик РЗБ, зокрема міцності на стиск та модуля пружності. Для цього виконано випробування стандартних бетонних кубів і призм. Після твердіння у нормальних умовах протягом 28 днів зразки були обміряні та зважені з метою визначення густини бетону та площі навантаженої поверхні.

Таблиця 1

Результати випробувань зразків-кубів з рециклінгового бетону

Номер зразка	Розміри, мм	Маса, г	Густина, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, f _{c,cube} , МПа
1.1	105 × 100 × 100	2270	2,162	443,75	40,149
1.2	104 × 101 × 100	2285	2,175	467,50	42,282

Таблиця 2

Результати випробувань зразків-призм з рециклінгового бетону

Номер зразка	Розміри, мм	Маса, г	Густина, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, f _{c,prism} , МПа	Модуль пружності, E _{cm} , ГПа
1.1	104 × 101 × 404	9265	2,183	319,50	30,42	32,16
1.2	105 × 101 × 402	9220	2,163	311,25	29,34	32,98

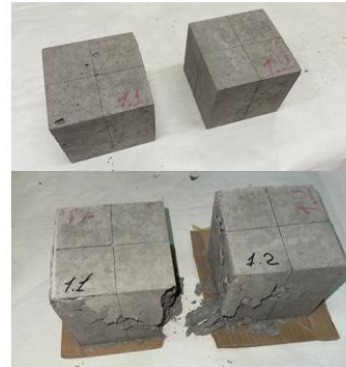


Рис. 2. Загальний вигляд зразків-кубів до та після випробування на стиск



Рис. 3. Загальний вигляд зразків-призм до та після випробування на визначення модулю пружності

Випробування бетонних зразків стандартних кубів та призм виконувались згідно чинних стандартів ДСТУ [12; 13] на пресі П-125. При випробуванні зразків призм на стиск навантаження прикладалося з кроком 12,5 кН. Зразки наведені на рисунках 2 та 3, результати випробувань представлено у таблицях 1 та 2. За результатами

випробувань було отримано відповідний клас бетону С32/40.

Згідно випробуваного складу бетону було закладено бетонний шар і створена композитна конструкція відповідно до розробленої схеми деревозалізобетонної панелі перекриття.

Навантаження під час випробувань прикладалося за допомогою гідравлічного преса ИПС-500. Передача зусилля від преса до зразка здійснювалася через дві точки навантаження за допомогою траверси. Схема прикладання навантаження разом із основними геометричними параметрами зразка наведена на рисунку 4.

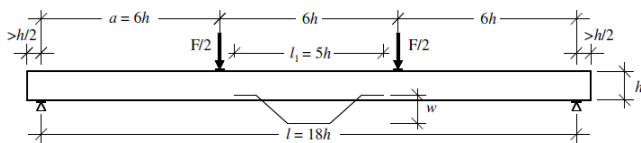


Рис. 4. Схема та геометричні параметри зразків для випробування на згин [9]

Вимірювання прогинів виконувалося за допомогою прогиномірів типу 6-ПАО, встановлених по обидві сторони плити. Загальний вигляд плити перед випробуваннями представлено на рисунку 5.



Рис. 5. Загальний вигляд конструкції перед випробуванням

Результати. У результаті проведених випробувань було визначено руйнівне навантаження дослідних зразків, а також встановлено характер їх руйнування, що представлено на рисунку 6.



Рис. 6. Руйнування конструкції під час випробування

Порівняння отриманих даних виконувалося на основі даних отриманих із аналогічної ПКД панелі того ж складу і серії виробництва, і була випробована відповідно до вимог чинних стандартів стандартів [14; 15]. Результати експериментальних досліджень наведені у роботі [16], де визначено основні фізико-механічні характеристики плити з ПКД, представлені в таблиці 3, у порівнянні із результатами даного експериментального дослідження.

Таблиця 3

Результати випробування зразків ПКД-панелей на згин

№ п/п	Маркування зразка	Лінійні розміри			Руйнівне навантаження, кН	Прогин при $0.6F_{max}$, w_e , мм	Час досягнення руйнівного навантаження, с
		Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм			
1	ПКД	2000	600	90	45	13,5	320
2	ПКД з РЗБ	2000	600	140	52	10,0	350

Несуча здатність експериментального зразка при згині визначається сумарним внеском міцності деревини зовнішнього розтягнутого шару та міцності бетонного шару у його розтягнутій зоні. Під час випробувань руйнування розпочиналося з утворення тріщин вздовж річних кілець деревини нижнього шару з подальшим розривом розтягнутих волокон.

Водночас у бетонній плиті зафіксовано утворення тріщин переважно спостерігалось у місцях розташування анкерних елементів. Відшарування бетонної стяжки від поверхні

плити з ПКД в момент руйнування становило приблизно 2 мм. Загальний характер руйнування конструкції наведено на рисунку 6.

Відповідно до результатів експериментальних випробувань встановлено, що руйнівне навантаження дослідженого зразка (ПКД-РЗБ) перевищує відповідний показник ПКД-панелі на 7 кН, що відповідає збільшенню приблизно на 15 %.

Висновки

У межах дослідження було розроблено та експериментально випробувано композитну плиту з перехресно-клеєної деревини з бетонним шаром на рециклінговому заповнювачі (ПКД з РЗБ).

Експериментальні дослідження характеристик композитної панелі ПКД з РЗБ проведено відповідно до вимог національних стандартів ДСТУ та європейських нормативних документів. Дерев'яна частина конструкції виконана з панелей ПКД, виготовлених із хвойних порід деревини місцевого походження.

Бетонна частина виконана з бетонної суміші на крупному заповнювачі рециклінгового походження. Додатковим

елементом підсилення бетонного шару з крупним заповнювачем рециклінгового походження є армування у сіткою з дроту Ø1 мм, розташованої по всій площі анкерного поля.

Для визначення фізико-механічних характеристик бетонного шару було проведено випробування зразків рециклінгового бетону на стиск із використанням кубів, а також визначено модуль пружності за результатами випробувань призм. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що міцність на стиск зразків-кубів рециклінгового бетону становить 41,216 МПа, а модуль пружності – 21,379 ГПа, що відповідає класу бетону С32/40. Руйнівне навантаження композитної плити ПКД з РЗБ досягло 52 кН, що перевищує відповідний показник звичайної плити ПКД на 7 кН, або приблизно на 15 %.

Отримані дані щодо класу бетону та несучої здатності деревозалізобетонної панелі перекриття в подальшому будуть використані для скінченноелементного моделювання напружено-деформованого стану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jayalath A., Navaratnam S., Ngo T., Mendis P. A., Hewson N., Aye L. Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 223. Pp. 110091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091> (дата звернення : 11.01.2025).
2. Shin B., Wi S., Kim S. Assessing the environmental impact of using CLT-hybrid walls as a sustainable alternative in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 294. Pp. 113228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113228> (дата звернення : 11.01.2025).
3. Yin T., Song H., Wang Z., Li L., Zheng W., Ju Z., Gong Y., Gong M. Long-term creep properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Industrial Crops and Products*. 2024. Vol. 211. Pp. 118238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118238> (access date : 11.01.2025).
4. Hansen R. N. et al. Environmental consequences of shifting to timber construction : The case of Denmark. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Vol. 46. Pp. 54–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.014>
5. Barbhuiya S. et al. Decarbonising cement and concrete production : Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 86. Pp. 108861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861>
6. Esmaeildoust S., Tomlinson D., Chui Y. H. Performance of Timber-Concrete Composite (TCC) Systems Connected with Inclined Screws : A Literature Review. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9, № 1. Pp. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs9010013> (date of access : 27.09.2025).
7. Lamothe S. et al. Lightweight and slender timber-concrete composite floors made of CLT-HPC and CLT-UHPC with ductile notch connectors. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 243. Pp. 112409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112409> (date of access : 22.08.2025).
8. ДСТУ EN 14080:2013, (EN 14080:2013, IDT). Конструкції дерев'яні. Шарувата клеєна деревина та масивна клеєна деревина. Вимоги. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Київ, 2013.

9. ДСТУ EN 338:2022, (EN 338:2016, IDT). Конструкційний лісоматеріал. Класи міцності. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Київ, 2022.

10. Савицький М., Смирнов А. Властивості вторинних крупних заповнювачів, отриманих в результаті подрібнення бетонних відходів. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2024. № 14. С. 19–28. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>

11. Смирнов А. С., Савицький М. В., Нікіфорова Т. Д., Бордун М. В., Титюк А. А., Федін В. А. Особливості розрахунку складу важкого бетону з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 113. С. 166–175. DOI 10.33042/2311-7257.2025.113.1.20.

12. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2010.

13. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта пуассона. [Чинний від 2009-12-22]. Вид. офіц. Київ, 2010.

14. EN 16351:2021. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.

15. EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.

16. Шехоркіна С. Є., Бордун М. В., Мерилова І. О., Лясота О. В., Федін В. А. Експериментальне дослідження міцності перехресно-клеєної деревини. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. Вип. 2 (026). С. 140–146. URL: <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.270425.140.1153>

REFERENCES

1. Jayalath A., Navaratnam S., Ngo T., Mendis P.A., Hewson N. and Aye L. Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*. 2020, vol. 223, pp. 110091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091> (date of access : 11.01.2025).

2. Shin B., Wi S. and Kim S. Assessing the environmental impact of using CLT-hybrid walls as a sustainable alternative in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*. 2023, vol. 294, pp. 113228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113228> (date of access : 11.01.2025).

3. Yin T., Song H., Wang Z., Li L., Zheng W., Ju Z., Gong Y. and Gong M. Long-term creep properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Industrial Crops and Products*. 2024, vol. 211, pp. 118238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118238> (date of access : 11.01.2025).

4. Hansen R.N. et al. Environmental consequences of shifting to timber construction : The case of Denmark. *Sustainable Production and Consumption*. 2024, vol. 46, pp. 54–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.014>

5. Barbhuiya S. et al. Decarbonising cement and concrete production : Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. 2024, vol. 86, pp. 108861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861>

6. Esmaeildoust S., Tomlinson D. and Chui Y.H. Performance of Timber-Concrete Composite (TCC) Systems Connected with Inclined Screws : A Literature Review. *Journal of Composites Science*. 2025, vol. 9, no. 1, pp. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs9010013> (date of access : 27.09.2025).

7. Lamothe S. et al. Lightweight and slender timber-concrete composite floors made of CLT-HPC and CLT-UHPC with ductile notch connectors. *Engineering Structures*. 2021, vol. 243, pp. 112409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112409> (date of access : 22.08.2025).

8. ДСТУ EN 14080:2013 (EN 14080:2013, IDT). Конструкції деревини. Шарувата клеєна деревина та масивна клеєна деревина. Вимоги. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») [DSTU EN 14080:2013 (EN 14080:2013, IDT). Wooden structures. Glued laminated timber and solid glued structural timber. Requirements. Developer : State Enterprise «Ukrainian Scientific, Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality» (SE «UkrNDNC»)]. Kyiv, 2013. (in Ukrainian).

9. ДСТУ EN 338:2022 (EN 338:2016, IDT). Конструкційні лісоматеріали. Класи міцності. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») [DSTU EN 338:2022 (EN 338:2016, IDT). Structural timber. Strength classes. Developer : State Enterprise «Ukrainian Scientific, Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality» (SE «UkrNDNC»)]. Kyiv, 2022. (in Ukrainian).

10. Savytskyi M. and Smyrnov A. *Vlastyvosti vtrynykh krupnykh zapovnyuvachiv, otrymanykh v rezul'tati podribnennya betonnykh vidkhodiv* [Properties of recycled coarse aggregates obtained from crushed concrete waste]. *Budiveln'i konstruktsiyi. Teoriya i praktyka* [Building constructions. Theory and Practice]. 2024, vol. 14, pp. 19–28. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>. (in Ukrainian).

11. Smyrnov A., Savytskyi M., Nikiforova T., Bordun M., Tytiuk A. and Fedin V. *Osoblyvosti rozrakhunku skladu vazhkoho betonu z vykorystannyam krupnogo zapovnyuvacha retsyklinhovoho pokhodzhennya* [Features of designing the

composition of heavy concrete with the use of coarse aggregate of recycling origin]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. 2025, no. 113, pp. 166–175. URL: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.20> (in Ukrainian).

12. *DSTU B V.2.7-214:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyimi zrazkami. Chynnyy vid 2010-09-01. Vyd. ofits.* [DSTU B V.2.7-214:2009. Building Materials. Concretes. Methods for Determining Strength Using Control Samples. Effective from 2010-09-01. Official Edition]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).

13. *DSTU B V.2.7-217:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya pryzmovoyi mitsnosti, modulii pruzhnosti i koeffitsiyenta Puassona. Chynnyy vid 2009-12-22. Vyd. ofits.* [DSTU B V.2.7-217:2009. Building Materials. Concretes. Methods for Determining Prism Strength, Modulus of Elasticity, and Poisson's Ratio. Effective from 2009-12-22. Official Edition]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).

14. EN 16351:2021. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.

15. EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.

16. Shekhorkina S., Bordun M., Merylova I., Liasota O. and Fedin V. *Eksperymental'ne doslidzhennya mitsnosti perekhresno-kleyenoyi derevyny* [Experimental investigation of the strength of cross-laminated timber]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2025, vol. 2 (026), pp. 140–146. URL: <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.270425.140.1153> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.03.2026.

Прийнято після рецензування: 10.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.