

Внукова Наталія Володимирівна¹, Слобожанюк Владислав Сергійович¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

<https://orcid.org/0000-0002-4097-864X>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<https://orcid.org/0009-0004-4787-6947>

Технології Mass Timber як інструмент декарбонізації та прискореного відновлення житлової інфраструктури Харкова в межах концепції Net Zero.

Mass Timber Technologies as a Tool for Decarbonization and Accelerated Recovery of Kharkiv's Housing Infrastructure within the Net Zero Concept.

Анотація:

У статті представлено наукове обґрунтування доцільності використання масивної деревини (CLT, Glulam) у процесі післявоєнного відновлення міської інфраструктури. За результатами математичного моделювання вуглецевого балансу встановлено, що застосування технологій Mass Timber забезпечує здатність матеріалу акумулювати до 900 кг CO₂ на 1 м³. Проведений порівняльний аналіз із традиційними залізобетонними рішеннями засвідчив переваги дерев'яної інженерії, зокрема скорочення тривалості монтажу до 70% та зменшення маси конструкцій приблизно у п'ять разів.

На основі отриманих результатів розроблено рекомендації щодо формування регіонального виробничого кластера в Харківській області.

Ключові слова: *Mass Timber, CLT, декарбонізація, Net Zero, відновлення Харкова.*

The article presents a scientific justification for the feasibility of using mass timber (CLT, Glulam) in the process of post-war reconstruction of urban infrastructure. Based on the results of mathematical modeling of the carbon balance, it has been established that the application of Mass Timber technologies enables the material to store up to 900 kg of CO₂ per 1 m³. A comparative analysis with traditional reinforced concrete solutions has demonstrated the advantages of timber engineering, particularly a reduction in construction time by up to 70% and a decrease in structural weight by approximately five times.

Based on the obtained results, recommendations have been developed for the creation of a regional production cluster in the Kharkiv region.

Keywords: Mass Timber, CLT, decarbonization, Net Zero, reconstruction of Kharkiv.

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку світової будівельної галузі спостерігається трансформація підходів - від орієнтації на зниження експлуатаційних енерговитрат до суттєвого скорочення так званого «втіленого вуглецю» (embodied carbon). За інформацією Global Alliance for Buildings and Construction, будівельний сектор формує приблизно 37% глобальних викидів CO₂, що визначає декарбонізацію цієї сфери як ключову умову досягнення цілей [1]. Питання властивостей масивної деревини та її екологічної ролі розглянуті в контексті життєвого циклу дерев'яних будівельних систем. Для України, з огляду на масштабні руйнування житлової та промислової інфраструктури, спричинені військовою агресією, питання відновлення міського середовища набуває не лише соціально-

гуманітарного, але й стратегічного екологічного значення. Особливої актуальності воно набуває для великих міст, зокрема Харкова, де значні обсяги пошкоджень зумовлюють необхідність застосування інноваційних, оперативних і низьковуглецевих будівельних рішень [2].

Проблема та її зв'язок із науковими завданнями. Традиційні підходи до відбудови, що передбачають використання залізобетону та сталі, відзначаються високим рівнем вуглецевого навантаження та значною тривалістю реалізації проєктів. У цьому контексті перспективною альтернативою виступає впровадження технологій Mass Timber (зокрема CLT - Cross-Laminated Timber і Glulam). Сутність наукової проблеми полягає у формуванні методологічних засад інтеграції дерев'яних конструкцій у систему післявоєнного відновлення великих урбанізованих територій. Це передбачає проведення оцінки життєвого циклу матеріалів (LCA), дослідження потенціалу акумулювання вуглецю, а також розроблення адаптивних конструктивних рішень для гібридної реконструкції пошкодженого житлового фонду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вивчення властивостей масивної деревини та її ролі у забезпеченні сталого розвитку висвітлені у працях провідних європейських і північноамериканських науковців (M. Green, F. Lattke, G. Torgert). У цих дослідженнях значна увага приділяється характеристикам вогнестійкості, сейсмостійкості та акустичним властивостям CLT-панелей. Водночас у вітчизняній науковій літературі проблематика використання технологій Mass Timber для масштабного відновлення урбанізованих територій у постконфліктний період залишається недостатньо розробленою, що зумовлює наявність прогалин як у теоретичному, так і в практичному забезпеченні розвитку містобудування.

Метою даної статті є наукове обґрунтування доцільності застосування технологій Mass Timber як інструменту декарбонізації та прискореного відновлення житлових кварталів Харківської області на прикладі м. Харкова. У дослідженні здійснюється аналіз техніко-економічних характеристик дерев'яного домобудування, оцінюється потенціал місцевої сировинної бази, а також формується концептуальне бачення створення регіонального виробничо-інженерного кластеру для реалізації завдань програми Rebuild Ukraine.

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети у дослідженні використано комплексний науковий підхід, що передбачає застосування низки взаємодоповнюючих методів. По-перше, застосовано метод порівняльного аналізу, який передбачає зіставлення техніко-економічних та екологічних характеристик традиційних залізобетонних конструкцій і систем Mass Timber (CLT, Glulam) за такими параметрами, як маса, тривалість монтажу та показники теплопровідності. По-друге, використано підхід оцінки життєвого циклу (LCA) та визначення рівня «втіленого вуглецю», у межах якого здійснено розрахунок показника embodied carbon для огорожувальних конструкцій із CLT відповідно до стандартів ISO 14040/14044 у межах стадій A1–A3 (Cradle-to-Gate). Отримані результати (див. табл. 1) засвідчують переваги дерев'яної інженерії порівняно з традиційними конструкціями [3].

Крім того, у роботі застосовано метод математичного моделювання вуглецевого балансу, що дало змогу кількісно оцінити екологічний потенціал досліджуваного матеріалу. Отримана математична залежність може розглядатися як базова основа для подальшої монетизації екологічних ефектів, зокрема у вигляді отримання вуглецевих кредитів у процесі реалізації проєктів відновлення Харкова. Окрему увагу приділено аналізу регіональної ресурсної бази, який здійснено на основі кластерного підходу до оцінювання лісового фонду Харківської, Сумської та Полтавської областей з метою визначення потенціалу локалізації виробництва.

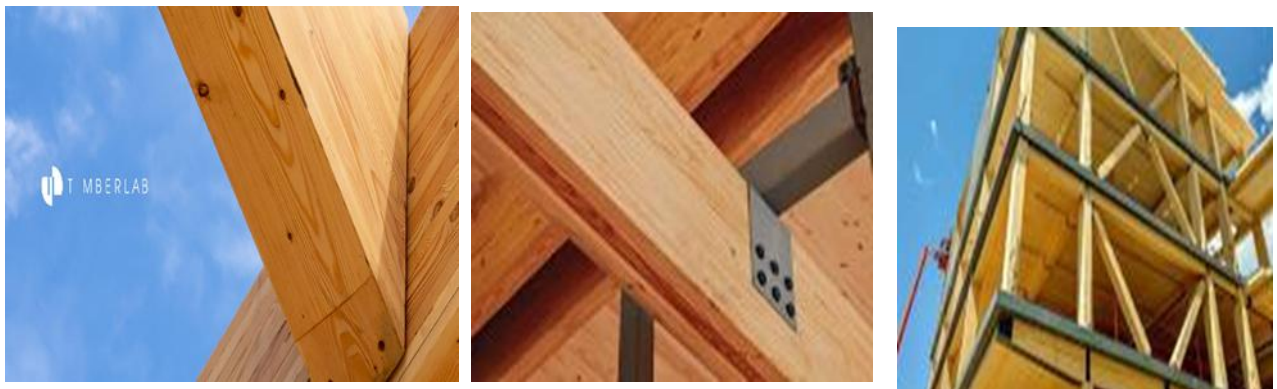
РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Авторами здійснено техніко-економічне та екологічне порівняння будівельних матеріалів. У межах дослідження виконано зіставлення систем Mass Timber із традиційними залізобетонними конструкціями. Отримані результати (див. табл. 1) засвідчують переважання дерев'яної інженерії за ключовими параметрами, що є визначальними для оперативного відновлення м. Харкова [4].

Таблиця 1. Порівняльна характеристика конструктивних систем

Параметр	Залізобетон	Mass Timber (CLT/Glulam)	Ефект
Питома маса	~2500 кг/м³	~500 кг/м³	Зменшення ваги у 5 разів
Термін монтажу	100% часу	35% часу	Прискорення будівництва у 3 рази
Теплопровідність	~1.7 Вт/(м·К)	~0.13 Вт/(м·К)	Підвищення енергоефективності стін
Вуглецевий слід	Емісія (+450 кг)	Секвестрація (–800 кг)	Декарбонізація на рівні –1250 кг/м³

У ході дослідження встановлено, що використання технологій Mass Timber забезпечує не лише прискорення процесів відновлення житлового фонду, але й суттєве зменшення навантаження на пошкоджені фундаменти завдяки незначній масі конструкцій, а також формує високий рівень термомодернізації будівель уже на базовому рівні [5].



Проведені розрахунки показника «втіленого вуглецю» (embodied carbon) для огорожувальних конструкцій із CLT відповідно до стандартів ISO 14040/14044 у межах стадій A1–A3 (Cradle-to-Gate) охоплювали такі складові. Зокрема, встановлено, що енергетичні витрати на виробництво CLT, включаючи етапи заготівлі, сушіння та пресування, є на 50–70% нижчими порівняно з виготовленням еквівалентного обсягу залізобетону. У межах аналізу вуглецевого балансу для стадій A1–A3 визначено, що викиди CO₂, пов'язані з промисловим виробництвом панелей (з урахуванням транспортування, застосування клейових систем та енергоспоживання), становлять лише близько 12–15% від загального обсягу вуглецю, акумульованого у структурі деревини.

Отримані результати свідчать про формування від'ємного сумарного показника глобального потенціалу потепління (GWP) на етапі виходу продукції з виробництва, що

дозволяє розглядати технології Mass Timber як джерело позитивного екологічного ефекту у межах реалізації проєктів відновлення [6].

Застосована у дослідженні математична модель забезпечила можливість кількісної оцінки екологічного потенціалу досліджуваного матеріалу.

Визначення обсягів депонованого вуглецю на основі щільності деревини та вмісту целюлози за формулою:

$$C_{store} = V \cdot \rho \cdot f_c \cdot (M_{CO_2}/M_C),$$

де V — об'єм матеріалу, ρ — щільність, f_c — частка вуглецю в біомасі, M — молекулярні маси.

Основні аспекти розрахунку:

Використана математична модель дозволила кількісно оцінити екологічний потенціал матеріалу.

1. Визначення обсягів депонованого вуглецю на основі щільності деревини та вмісту целюлози за формулою:

$$C_{store} = V \cdot \rho \cdot f_c \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_C}$$

де V — об'єм матеріалу, ρ — щільність, f_c — частка вуглецю в біомасі, M — молекулярні маси.

Основні аспекти розрахунку

Концентрація вуглецю (f_c): Для хвойних порід (сосна), що переважають у лісах північно-східного регіону України, частка вуглецю в сухій біомасі становить ~50% ($f_c \approx 0.5$).

$$f_c \approx 0.5$$

Молекулярна конверсія (M_{CO_2}/M_C): Коефіцієнт 3.67 відображає перерахунок маси чистого вуглецю в об'єм поглинутого з атмосфери вуглекислого газу.

$$\frac{M_{CO_2}}{M_C} = \frac{44}{12} = 3.67$$

Практичне значення: Розрахунок за даною формулою доводить, що за щільності $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ кожен кубометр конструкції «консервує» ~917 кг CO_2 .

$$C_{store} = 500 \cdot 0.5 \cdot 3.67 \approx 917 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{м}^3$$

Це свідчить про доцільність використання запропонованої моделі як базової основи для подальшої монетизації екологічних ефектів, зокрема у формі отримання вуглецевих кредитів у межах реалізації проєктів відновлення Харківської області.

З метою формування об'єктивного уявлення про ресурсні можливості було здійснено аналіз регіональної сировинної бази та потенціалу локалізації виробництва. Результати кластерного аналізу лісового фонду Північно-Східного регіону України засвідчили наявність достатнього ресурсного забезпечення для розгортання виробництва Mass Timber. Зокрема, встановлено, що сумарна площа лісових масивів Харківської, Сумської та Полтавської областей перевищує 1,2 млн га, при цьому домінуючими породами є сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) та дуб черешчатий (*Quercus robur*), які характеризуються високими показниками міцності (класи C24/D30) [6].

Крім того, визначено наявність логістичної синергії: розташування Харкова як потужного транспортно-логістичного вузла забезпечує мінімальну відстань перевезень (у

межах 200–250 км) від місць заготівлі сировини до виробничих майданчиків, що сприяє зниженню непрямих викидів CO₂ у процесі транспортування.

Окрему увагу приділено можливостям локалізації виробництва, зокрема встановлено, що наявність у Харкові розвиненої машинобудівної та деревообробної бази створює передумови для формування спеціалізованого кластеру з виробництва CLT-панелей орієнтовною потужністю 30–50 тис. м³ на рік, що здатен повною мірою забезпечити потреби регіону у швидкому відновленні житлового фонду.

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведене дослідження підтверджує, що впровадження технології **Mass Timber** є стратегічно пріоритетним напрямом для післявоєнного відновлення м. Харкова. Застосування CLT-панелей та Glulam-конструкцій дозволяє одночасно вирішити три критичні завдання:

1. **Технічне:** Зменшення ваги конструкцій у 5 разів, що дає змогу відновлювати пошкоджені будівлі без посилення фундаментів.
2. **Часове:** Скорочення термінів будівництва на 60–70% за рахунок заводської префабрикації.
3. **Екологічне:** Перетворення міста на «вуглецеве сховище», де кожен кубометр деревини утримує ~900 кг CO₂, що відповідає стандартам **Net Zero**.

Практичні рекомендації для органів влади та інвесторів:

1. Створення Харківського інноваційного кластера деревної інженерії: Локалізувати виробництво CLT-панелей на базі одного з промислових майданчиків регіону. Це забезпечить незалежність від імпорту, створить робочі місця та знизить собівартість будівництва на 20–25%.
2. Адаптація нормативно-правової бази: Ініціювати розробку та впровадження регіональних будівельних норм (або адаптацію ДБН до Eurocode 5), які б деталізували вимоги до вогнестійкості та сейсмостійкості багатоповерхових дерев'яних будівель.
3. Запуск пілотного проєкту «Зелений квартал»: Реалізувати проєкт відновлення житлового будинку на Північній Салтовці з використанням гібридної системи (залізобетонний фундамент + Mass Timber каркас). Це стане демонстраційним майданчиком для міжнародних донорів (EIB, EBRD, NEFCO).
4. Монетизація екологічних ефектів: Розробити механізм верифікації задепонованого вуглецю в об'єктах відновлення для подальшого продажу вуглецевих квот (Carbon Credits) на міжнародних ринках. Отримані кошти спрямувати на субсидування соціального житла.
5. **Підготовка кадрів:** На базі провідних ВНЗ Харкова (ХНУБА, ХНУМГ) відкрити спеціалізовані курси з BIM-проєктування та розрахунку дерев'яних конструкцій для архітекторів та інженерів.

Результати підтверджують, що технологія Mass Timber є не лише екологічно доцільною, а й економічно виправданою стратегією для швидкого відновлення Харкова і використовуватись як пілотний проєкт для регіонів України, які потребують швидкого високотехнологічного вуглецевонеїтрального відновлення. Впровадження цієї технології дозволяє перетворити процес відбудови на масштабний кліматичний проєкт міжнародного рівня. **Результати дослідження мають практичне значення** для формування муніципальної стратегії сталого розвитку «Харків 2030» та можуть бути використані як дорожня карта для реалізації програми *Rebuild Ukraine*.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА:

1. Churkina, G., Organschi, A., Reyser, C. P., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269-276.

2. Peñaloza, D., Erlandsson, M., & Berglund, L. (2016). *Life cycle assessment of multi-storey buildings made of cross-laminated timber (CLT) in Sweden*. *Environmental Science & Policy*.
3. Torgert, G., & Lattke, F. (2018). *Timber construction in Europe: Innovation and sustainability*. *Journal of Architectural Engineering*.
4. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). *A Synthesis of Research on the Environmental Efficiencies of Wood Technologies in Construction*. Vancouver: FPInnovations.
5. Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*. FPInnovations.
6. Brandner, R. (2013). *Cross laminated timber (CLT) in Europe: state of the art*. University of Graz.