

УДК 502.131.1:69.059.7:691.11

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ MASS TIMBER У СТРАТЕГІЇ NET ZERO ТА ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ (НА ПРИКЛАДІ М. ХАРКОВА)

Н.В. Внукова, В.С. Слобожанюк

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків
vnukovanv@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-4097-864X>

У роботі досліджено потенціал інтеграції технологій Mass Timber (CLT, Glulam) у стратегії декарбонізації будівельного сектору відповідно до концепції Net Zero та потреб післявоєнного відновлення України. Проведено порівняльний аналіз техніко-економічних і екологічних характеристик дерев'яних інженерних конструкцій та традиційних залізобетонних систем. Для оцінювання вуглецевого сліду застосовано методологію оцінки життєвого циклу (LCA) відповідно до стандартів ISO 14040/14044 на стадіях A1–A3 (Cradle-to-Gate). Встановлено, що використання Mass Timber забезпечує зниження втіленого вуглецю, скорочення термінів будівництва, підвищення енергоефективності будівель та формування позитивного вуглецевого балансу завдяки довгостроковому депонуванню CO₂ у деревині. На основі математичного моделювання визначено, що 1 м³ конструкційної деревини здатний акумулювати близько 917 кг CO₂. Досліджено ресурсний потенціал Північно-Східного регіону України та обґрунтовано можливість створення регіонального Mass Timber-кластера для забезпечення потреб відновлення житлової інфраструктури. Запропоновано практичні рекомендації щодо локалізації виробництва CLT, адаптації нормативної бази до вимог Eurocode 5, реалізації демонстраційних проєктів та впровадження механізмів монетизації вуглецевих ефектів через ринки вуглецевих кредитів. Отримані результати підтверджують доцільність використання технологій Mass Timber як одного з ключових інструментів сталого післявоєнного відновлення та декарбонізації будівельного сектору України.

Ключові слова: Mass Timber, Net Zero, стале будівництво; депонування CO₂; дерев'яні інженерні конструкції

1. ВСТУП

Будівельний сектор є одним із найбільших джерел викидів парникових газів, формуючи близько 37 % глобальних енергетично пов'язаних викидів CO₂ [1]. У зв'язку з цим пріоритетним напрямом сучасного будівництва стає скорочення «втіленого вуглецю» (embodied carbon) та впровадження низьковуглецевих технологій відповідно до цілей кліматичної нейтральності та концепції Net Zero [2].

Одним із перспективних рішень є технології Mass Timber (CLT, Glulam), які поєднують високі конструктивні характеристики із здатністю довгострокового депонування вуглецю та меншим вуглецевим слідом порівняно з традиційними будівельними матеріалами.

Для України актуальність цієї проблематики значно посилюється в умовах післявоєнного

відновлення житлової та міської інфраструктури. Масштабні руйнування вимагають впровадження інноваційних будівельних рішень, здатних забезпечити одночасно швидкість відбудови, ресурсну ефективність та екологічну стійкість. У цьому контексті інтеграція технологій Mass Timber може стати одним із інструментів реалізації принципів сталого розвитку та декарбонізації будівельного сектору України [3].

Метою дослідження є науково-методичне обґрунтування ролі та ефективності інтеграції технологій Mass Timber (CLT, Glulam) у стратегії декарбонізації будівельного сектору (Net Zero) та формування моделей сталого післявоєнного відновлення міської інфраструктури України. У межах досягнення мети передбачено оцінювання техніко-економічних та екологічних характеристик дерев'яних інженерних конструкцій у порівнянні

з традиційними матеріалами, визначення їхнього потенціалу скорочення втілених викидів вуглецю (embodied carbon) на основі LCA-підходу відповідно до ISO 14040/14044, а також аналіз можливостей локалізації виробництва Mass Timber із використанням регіональної сировинної бази для формування інноваційних кластерів відновлення територій України.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні застосовано міждисциплінарний підхід, що поєднує методи порівняльного аналізу, оцінки життєвого циклу (LCA) та математичного моделювання вуглецевого балансу в контексті концепції Net Zero.

На першому етапі проведено порівняння традиційних залізобетонних конструкцій і систем Mass Timber (CLT, Glulam) за техніко-економічними та екологічними показниками (маса, тривалість монтажу, теплотехнічні характеристики, вуглецевий слід), що дозволило оцінити їх ефективність для швидкого відновлення інфраструктури [4].

Другим етапом виконано LCA-аналіз відповідно до ISO 14040/14044 для стадій A1–A3 з визначенням embodied carbon, що підтвердило нижчий вуглецевий слід дерев'яних конструкцій

порівняно з традиційними матеріалами. Функціональна одиниця виміру - 1 м³ конструкційного матеріалу [5].

Додатково застосовано модель вуглецевого балансу деревини для кількісної оцінки потенціалу депонування CO₂ у Mass Timber, що створює основу для подальшої оцінки кліматичних ефектів та можливого використання вуглецевих кредитів.

Також проаналізовано регіональну ресурсну базу Північно-Східної України (Харківська, Сумська, Полтавська області) з позиції потенціалу локалізації виробництва та формування кластеру Mass Timber як елементу післявоєнного відновлення.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У ході дослідження проведено комплексне техніко-економічне та екологічне порівняння будівельних матеріалів із фокусом на системи Mass Timber та традиційні залізобетонні конструкції. Результати, наведені в табл. 1, демонструють переваги дерев'яних інженерних рішень за основними критеріями, що мають ключове значення для швидкого та ефективного відновлення міської інфраструктури м. Харкова.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика конструктивних систем
Table 1 – Comparative Characteristics of Structural Systems

Параметр	Залізобетон	Mass Timber (CLT/Glulam)	Ефект
Питома маса	~2500 кг/м ³	~500 кг/м ³	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/м ³

У результаті дослідження встановлено, що застосування технологій Mass Timber сприяє не лише скороченню термінів відбудови житлової інфраструктури, але й істотно знижує навантаження на існуючі пошкоджені фундаменти завдяки малій масі конструкцій [8]. Крім того, такі рішення забезпечують підвищений рівень енергоефективності будівель уже на базовому конструктивному рівні.

Проведено розрахунок показника «втіленого вуглецю» (embodied carbon) для огорожувальних конструкцій із CLT відповідно до стандартів ISO 14040/14044 на стадіях A1–A3 (Cradle-to-Gate), що охоплюють основні етапи виробництва. Встановлено, що енергетичні

витрати на виготовлення CLT, включаючи заготівлю деревини, сушіння та пресування, є на 50–70% нижчими, ніж при виробництві еквівалентного обсягу залізобетонних конструкцій [6].

У межах оцінки вуглецевого балансу визначено, що сумарні викиди CO₂, пов'язані з виробництвом CLT-панелей (з урахуванням транспортування, застосування клейових систем та споживання енергії), становлять близько 12–15% від кількості вуглецю, акумульованого в деревній структурі матеріалу.

Отримані результати свідчать про потенційну можливість досягнення дуже низького, а за окремих умов - навіть від'ємного значення

глобального потенціалу потепління (GWP) [7] на етапі виробництва, що підтверджує екологічну

ефективність застосування технологій Mass Timber у проєктах відновлення.

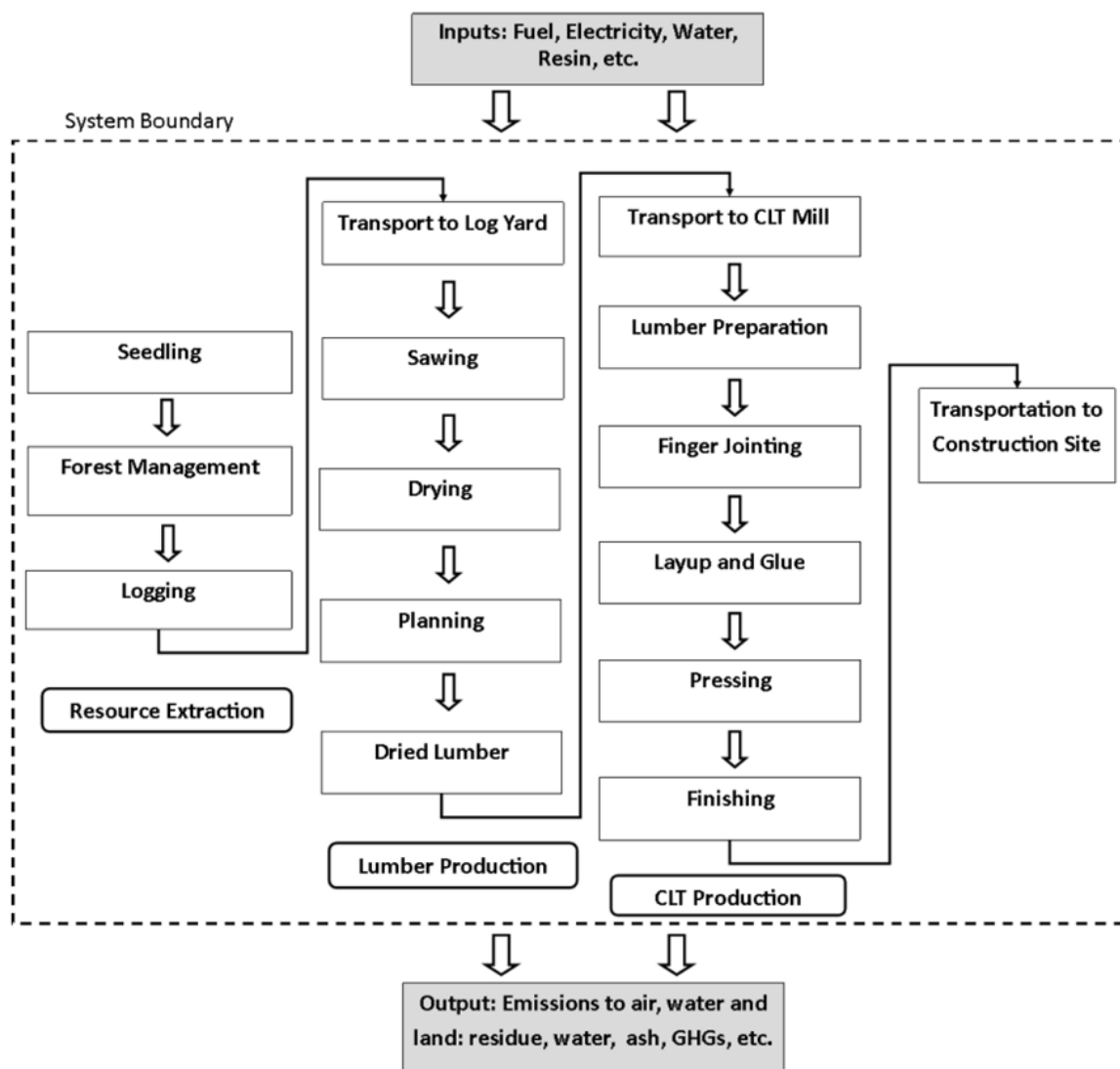


Рис. 1 – LCA-модель виробництва дерев'яних інженерних панелей

Fig. 1 – Life Cycle Assessment (LCA) Model for the Production of Engineered Wood Panels

Застосована у дослідженні математична модель забезпечила можливість кількісної оцінки екологічного потенціалу досліджуваного матеріалу. Методика відповідає підходам FAO та IPCC щодо оцінки вуглецю в біомасі.

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

$$C_{\text{store}} = V \cdot \rho \cdot f_c \cdot (M_{\text{CO}_2} / M_c),$$

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 $\sim 50\%$ ($f_c \approx 0.5$).

Молекулярна конверсія M_{CO_2} / M_c Коефіцієнт 3,67 відображає перерахунок маси чистого вуглецю в об'єм поглинутого з атмосфери вуглекислого газу.

Розрахунок за даною формулою доводить, що за щільності $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ кожен кубометр конструкції «консервує» $\sim 917 \text{ кг CO}_2$.

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

Це підтверджує доцільність використання запропонованої моделі як базової платформи для подальшої капіталізації екологічних ефектів, зокрема через механізми вуглецевого ринку та

отримання вуглецевих кредитів у межах реалізації програм відновлення Харківської області.

З метою оцінки можливостей впровадження Mass Timber у регіональному контексті здійснено аналіз сировинної бази та потенціалу локалізації виробництва. Результати кластерного аналізу лісових ресурсів Північно-Східної України свідчать про достатній рівень забезпеченості деревиною для організації виробництва інженерної деревини. Загальна площа лісового фонду Харківської, Сумської та Полтавської областей становить понад 1,2 млн га, при цьому переважають сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) та дуб звичайний (*Quercus robur*), які відповідають класам міцності C24/D30 і є придатними для конструкційного використання.

Додатково встановлено наявність значної логістичної переваги: географічне положення м. Харкова як великого транспортного вузла забезпечує ефективну організацію ланцюгів постачання із середньою відстанню транспортування сировини 200–250 км, що сприяє зниженню непрямих викидів CO₂, пов'язаних із логістичними процесами, відповідно до підходів оцінки життєвого циклу (LCA).

Окремо визначено високий потенціал для промислового розвитку виробництва CLT. Наявна в Харківському регіоні розвинена машинобудівна та деревообробна інфраструктура створює передумови для формування спеціалізованого Mass Timber-кластера з орієнтовною потужністю 30–50 тис. м³ на рік, який потенційно може забезпечити значну частину потреб регіону у відновленні житлового фонду.

Отримані результати підтверджують, що технології Mass Timber мають значний кліматичний потенціал у контексті реалізації стратегій Net Zero, оскільки забезпечують зниження втіленого вуглецю (embodied carbon) до від'ємних значень, а також формують довгострокове депонування атмосферного CO₂ у структурі деревини. Це дозволяє розглядати Mass Timber як потенційний елемент національних та регіональних стратегій декарбонізації будівельного сектору.

Водночас, незважаючи на суттєві екологічні та техніко-економічні переваги, впровадження технологій Mass Timber в Україні супроводжується низкою обмежень. Зокрема, до ключових технічних бар'єрів належить неповна імплементація європейського нормативного

середовища Eurocode 5 [11], а також обмежений практичний досвід проектування та зведення багатоповерхових дерев'яних конструкцій. Окремо слід враховувати аспекти будівельної безпеки, зокрема підвищені вимоги до пожежної стійкості та необхідність інкапсуляції дерев'яних елементів для забезпечення нормативної межі вогнестійкості. Економічні обмеження пов'язані з відносно високою початковою вартістю виробництва CLT, а також технологічною залежністю від клеєвих систем та імпортих компонентів, що може впливати на масштабованість впровадження даної технології в умовах післявоєнного відновлення.

4. ВИСНОВКИ

Проведене дослідження засвідчує, що впровадження технологій Mass Timber є стратегічно важливим напрямом для післявоєнного відновлення як України так і міста Харкова в контексті декарбонізації будівельного сектору та реалізації цілей Net Zero.

Використання CLT- та Glulam-систем дозволяє одночасно досягти таких ефектів:

1. Технічний ефект: зменшення маси конструкцій до 4–5 разів у порівнянні з залізобетонем, що знижує вимоги до фундаментів і дозволяє відновлення без їх повного посилення.

2. Часовий ефект: скорочення тривалості будівельно-монтажних робіт на 60–70% завдяки високому рівню заводської префабрикації.

3. Екологічний ефект: формування позитивного вуглецевого балансу, оскільки 1 м³ деревини акумулює в середньому 800–900 кг CO₂, що узгоджується з підходами до climate-positive будівництва.

Практичні рекомендації.

1. Формування регіонального Mass Timber-кластера. Доцільним є створення виробничо-інноваційного кластера на базі промислових майданчиків Харківського регіону з метою локалізації виробництва CLT. Це дозволить знизити вартість будівництва на 20–25% та зменшити залежність від імпортих поставок.

2. Нормативна адаптація будівельної бази. Необхідно гармонізувати національні будівельні норми з Eurocode 5 (EN 1995) для забезпечення проектування багатоповерхових дерев'яних будівель з урахуванням вимог пожежної та сейсмостійкості.

3. Пілотний проєкт демонстраційної забудови. Рекомендується реалізація пілотного

проекту «Зелений квартал» із використанням гібридної конструктивної системи (залізобетон + Mass Timber) на території Північної Салтівки як демонстраційного кейсу для міжнародних фінансових інституцій (EIB, EBRD, NEFCO).

4. Механізм монетизації вуглецевого ефекту. Доцільно розробити систему верифікації та обліку депонованого CO₂ у будівлях для подальшого виходу на ринки вуглецевих кредитів (Voluntary Carbon Market). Це відповідає підходам World Bank Carbon Markets Report Отримані кошти можуть бути спрямовані на фінансування соціального житла.

5. Підготовка кадрового потенціалу. Рекомендується впровадження спеціалізованих освітніх програм з ВІМ-проектування та розрахунку дерев'яних конструкцій на базі профільних ЗВО (ХНУБА, ХНУМГ) відповідно до європейських практик цифрового будівництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. IPCC (2022). AR6 WGIII. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
1. Advancing Net Zero: Embodied Carbon. World Green Building Council. URL: [https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European Green Deal](https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European-Green-Deal).
2. European Green Deal. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
3. EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance.
4. Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. FPIInnovations.
5. 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
6. Brandner, R. (2013). Cross laminated timber (CLT) in Europe: state of the art. University of Graz.
7. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). A Synthesis of Research on the Environmental Efficiencies of Wood Technologies in Construction. Vancouver: FPIInnovations.

8. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. Nature Sustainability, 3(4), 269-276.
9. Torgert, G., & Lattke, F. (2018). Timber construction in Europe: Innovation and sustainability. Journal of Architectural Engineering.
10. FAO (2020). Global Forest Resources Assessment. URL: <https://www.fao.org/home/en/>
11. EN 1995-1-1 (Eurocode 5). Timber structures. URL: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-5-design-timber-structures>

REFERENCES

1. IPCC (2022). AR6 WGIII. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
1. Advancing Net Zero: Embodied Carbon. World Green Building Council. URL: [https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European Green Deal](https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European-Green-Deal).
2. European Green Deal. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
3. EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance.
4. Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. FPIInnovations.
5. 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
6. Brandner, R. (2013). Cross laminated timber (CLT) in Europe: state of the art. University of Graz.
7. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). A Synthesis of Research on the Environmental Efficiencies of Wood Technologies in Construction. Vancouver: FPIInnovations.
8. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. Nature Sustainability, 3(4), 269-276.
9. Torgert, G., & Lattke, F. (2018). Timber construction in Europe: Innovation and sustainability. Journal of Architectural Engineering.
10. FAO (2020). Global Forest Resources Assessment. URL: <https://www.fao.org/home/en/>
11. EN 1995-1-1 (Eurocode 5). Timber structures. URL: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-5-design-timber-structures>
- 1.

INTEGRATION OF MASS TIMBER TECHNOLOGIES INTO NET ZERO STRATEGIES AND POST-WAR RECONSTRUCTION OF URBAN INFRASTRUCTURE IN UKRAINE (CASE STUDY OF KHARKIV)

N. V. Vnukova, V. S. Slobozhaniuk

Kharkiv National Automobile and Highway University
25 Yaroslava Mudroho Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

vnukovanv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4097-864X>

The study investigates the potential of integrating Mass Timber technologies, including Cross-Laminated Timber (CLT) and Glued Laminated Timber (Glulam), into building sector decarbonization strategies in accordance with the Net Zero concept and the requirements of post-war reconstruction in Ukraine. A comparative assessment of the technical, economic, and environmental performance of engineered timber systems and conventional reinforced concrete

structures was conducted. The carbon footprint of construction materials was evaluated using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in compliance with ISO 14040/14044 standards for the A1–A3 (Cradle-to-Gate) stages. The results demonstrate that Mass Timber technologies contribute to significant reductions in embodied carbon, accelerated construction processes, improved building energy efficiency, and the establishment of a positive carbon balance through long-term carbon sequestration in wood. Mathematical modelling showed that 1 m³ of structural timber can store approximately 917 kg of CO₂. The resource potential of North-Eastern Ukraine was analysed, confirming favourable conditions for the establishment of a regional Mass Timber cluster capable of supporting large-scale housing and infrastructure reconstruction. Practical recommendations are proposed regarding the localization of CLT production, adaptation of national regulations to Eurocode 5 requirements, implementation of pilot demonstration projects, and development of mechanisms for monetizing carbon benefits through voluntary carbon markets. The findings confirm that Mass Timber technologies can serve as one of the key instruments for sustainable post-war recovery and decarbonization of Ukraine's construction sector.

Keywords: Mass Timber; CLT; Glulam; Net Zero; sustainable construction; embodied carbon; carbon sequestration; engineered timber structures; post-war reconstruction; decarbonization.

Подання до редакції : 26. 02. 2026

Надходження остаточної версії : 22. 04. 2026

Публікація статті : 25. 05. 2026