

2.10 Моделювання та аналіз розрахунку CLT панелей в ЛІРА-САПР та RFEM

Cross-Laminated Timber (CLT) - це відносно нова технологія виготовлення дерев'яних панелей, що відкриває можливості до будівництва житлових та громадських об'єктів не тільки середньої, а навіть підвищеної поверховості. Традиційні методи будівництва з дерев'яних конструкцій не дають можливості створювати екологічну та водночас висотну архітектуру через обмежену несучу здатність звичайних дерев'яних конструкцій. Натомість, у 1996 році австрійські представники промисловості опрацювали ідею, що виникла в Швейцарії: виготовити багат шарову дерев'яну панель, що буде складатися з декількох перпендикулярних один до одного шарів, які під високим тиском склеєні між собою. Ця ідея настільки поширилася світом, що за дуже короткий час за технологією CLT почали зводити екологічно чисті та вражаючі будинки в Європі, Канаді та Японії. CLT панелі настільки зарекомендували себе в сучасному будівництві, що їх називають “альтернативою залізобетону”.

Конструкції CLT мають ряд переваг:

- суттєво менша об'ємна вага, у порівнянні з металом та бетоном, що зменшує навантаження на фундаменти і, відповідно, їхню вартість;
- CLT панелі є відмінним рішенням для забезпечення характеристик внутрішнього мікроклімату будівель та споруд через свої природні якості;
- міцнісні характеристики панелей сміливо конкурують з конструкціями із залізобетону;
- це екологічно чистий та безпечний матеріал;
- висока межа вогнестійкості, що підтверджена відповідними сертифікатами випробувань, які надаються заводом-виробником;

- доведено експериментально, що сейсмостійкість будинків із CLT панелей дозволяє будувати на ділянках із ймовірними дев'ятибальними землетрусами;
- економічно ефективні, оскільки готові панелі монтуються з мінімальними витратами часу та не потребують великої бригади робітників, панелі швидко виготовляються на заводі та при їх виробництві присутня мінімальна кількість відходів.



Рис.1 Загальний вигляд CLT панелі

CLT панелі є доволі універсальними конструктивними елементами, за допомогою яких можна досягати сміливих та унікальних архітектурних рішень.

Попри наявні переваги поперечно-клеєної деревини, є багато факторів, що стримують чи обмежують розвиток проектування будинків та споруд за технологією CLT:

- це нова для України технологія і багато забудовників не готові ризикувати, тому охоче обирають традиційні матеріали для будівництва;
- висока ціна через малу кількість виробників та відсутність конкуренції в цьому напрямку;
- відсутність кваліфікованих інженерів-конструкторів, що знайомі з CLT та здатні їх розрахувати та проектувати;
- відсутність нормативної бази, що містить пункти з рекомендаціями, обмеженнями, настановами щодо проектування CLT.

На сьогоднішній день на теренах України наукова та нормативна база по дослідженню та проектуванню CLT-конструкцій недостатньо розвинена. В

нормативній літературі [196] немає вказівок стосовно розрахунку даних конструкцій. В своїй монографії [197] Д. Михайловський в розділі 3 розглянув існуючі методики розрахунку ПКД-панелей за першим та другим граничними станами. Також автор вивів порівняльну таблицю, в якій чисельно окреслив існуючі методики розрахунку панелей з поперечно-клеєної деревини, які завантажені рівномірно розподіленим навантаженням, зокрема балочна теорія Тимошенка, γ -метод, композитний метод, теорія Крейзінгера.

Порівняльним аналізом методів Тимошенка та γ -метод займався колектив авторів [198], досліджуючи розрахунок міцності ПКД-панелей при згині. Окреслено переваги і недоліки даного методу [199], серед недоліків виявили, що γ -метод можна застосовувати лише при 3-х та 5-ти шарових панелях. Міцність даних панелей при зсуві та крученні досліджено в роботі [200], а при розтягу та стиску вздовж волокон в [201]. Ще одним із можливих методів розрахунку CLT панелей є метод зсувної аналогії [202], [203].

Країни Європи, Сходу та Америки активніше розвивають методи та інструменти для розрахунку і проєктування CLT конструкцій і мають більше наукових та методичних видань, посібників для проєктування [204-207]. Також компанії-виробники CLT панелей активно беруть участь у розробці продуктів саме для проєктувальників. [208-210]. На території України розташовано масштабне підприємство з виготовлення ПКД панелей, яке має відповідний сертифікат якості [211].

Крім описаних вище аналітичних методів розрахунку CLT панелей, дані конструкції можна розраховувати за допомогою методу кінцевих елементів. Зокрема, виконати такий розрахунок можна, використовуючи програмні комплекси ЛІРА-САПР та Dlubal RFEM.

У [197] досліджено та обґрунтовано можливість застосування програмного комплексу ЛІРА-САПР для розрахунку та аналізу напружено-деформованого стану CLT панелей та автором запропоновано аналітичну методику розрахунку приведених геометричних характеристик перерізу багатошарових панелей,

згідно якої розраховуються приведені модулі пружності вздовж (E_1) та поперек волокон (E_2) (формули 1-2).

Під час виконання даної роботи проведено розрахунок трьох типів CLT панелей: тришарової, п'ятишарової та семишарової, прольотом 6 метрів (Рис.1). Навантаження – рівномірно розподілене, рівне $q = 1,5 \text{ кН/м}^2$.

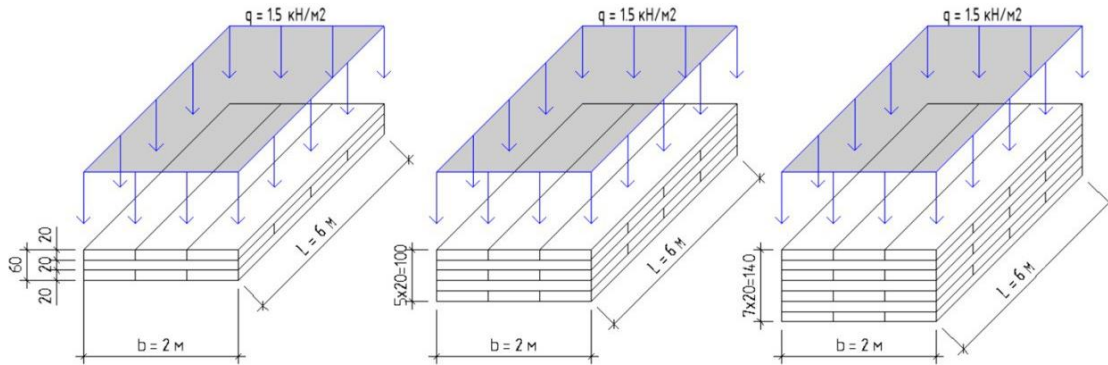


Рис.2 Схеми досліджуваних CLT панелей

Для реалізації дослідження порівняльного розрахунку на основі методу скінченних елементів (МСЕ) за допомогою ПК ЛІРА-САПР пораховано приведені характеристики плити для використання плоских скінченних елементів (СЕ) №44, що моделюють властивості роботи в двох напрямках – вздовж та поперек волокон деревини.

Матеріал – дерево класу С24.

Модуль зсуву $G = G_{\text{mean}} = 690 \text{ МПа}$.

Товщина шарів : $t = 20 \text{ мм}$.

Розміри СЕ пластини №44 : $0,2 \times 0,2 \text{ м}$

Загальний вид формул для приведених модулів пружності для 3-шарової панелі:

$$E_1 = \frac{12E_x}{(h_1+h_2+h_3)^3} \left(\frac{1}{12} (h_1^3 + h_2^3 + h_3^3 \frac{E_y}{E_x}) + (\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2})^2 h_1 + (\frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2})^2 h_3 \right) \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{12E_y}{(h_1+h_2+h_3)^3} \left(\frac{h_1^3+h_3^3}{12} + (\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2})^2 h_1 + (\frac{h_3}{2} + \frac{h_2}{2})^2 h_3 + \frac{h_2^3}{12} \frac{E_y}{E_x} \right) \quad (2)$$

де:

- E_x, E_y – модулі пружності шарів панелі вздовж та поперек волокон відповідно;
- $h_1 \dots h_2 \dots h_3 \dots h_n$ – товщини шарів панелі.

Провівши розрахунки, визначено та прийнято наступні значення
приведених модулів пружності:

- Тришарова панель: $E_1=10606$ МПа, $E_2=764$ МПа;
- П'ятишарова панель: $E_1=8789$ МПа, $E_2=2581$ МПа;
- Семишарова панель: $E_1=7932$ МПа, $E_2=3438$ МПа.

Коефіцієнти Пуассона

- вздовж волокон $\nu_0 = 0,49$
- поперек волокон $\nu_{90} = 0,0161$

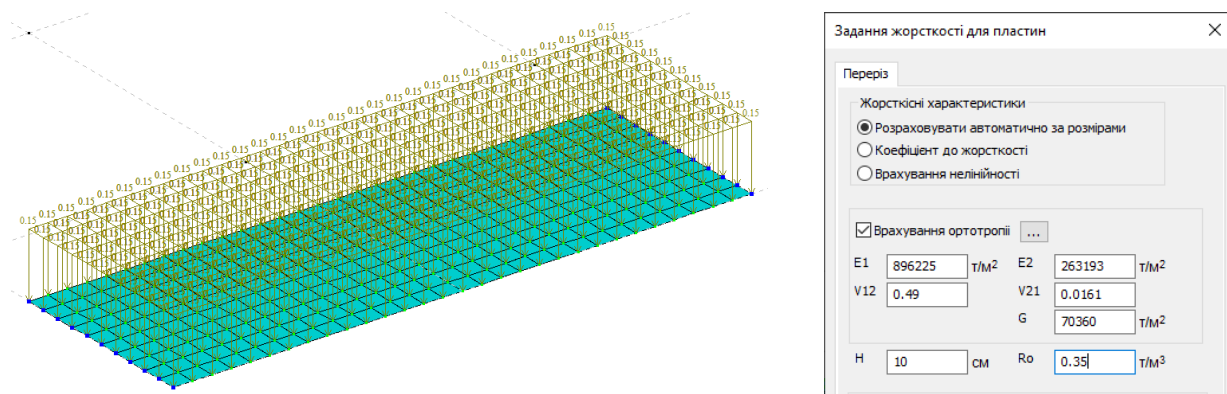


Рис. 3 Загальний вид розрахункової схеми в ЛІРА-САПР та задання жорсткості для СЕ

В розрахунковому комплексі Dlubal RFEM реалізовано розрахунок багат шарових конструкцій з використанням додаткового модуля RF-LAMINATE. Шари конструкцій можна створювати та налаштовувати на основі матеріалів з бази самого програмного комплексу або змінювати їх за потреби. Також програма дозволяє комбінувати моделі матеріалів – є можливість задати ортотропні та ізотропні матеріали в одній конструкції.

No.	Name	Assigned to Surfaces No.
3	Layers d : 100.0 mm Layers: 5	2

Main Layers Stiffness Matrix				
Layers				
Layer No.	Thickness	Material	Thickness t [mm]	Direction x β [deg]
1	Directly	2 - C24 Orthotropic Linear Elastic (Surfa...	20.0	90.00
2	Directly	2 - C24 Orthotropic Linear Elastic (Surfa...	20.0	0.00
3	Directly	2 - C24 Orthotropic Linear Elastic (Surfa...	20.0	90.00
4	Directly	2 - C24 Orthotropic Linear Elastic (Surfa...	20.0	0.00
5	Directly	2 - C24 Orthotropic Linear Elastic (Surfa...	20.0	90.00
6				

Рис.4 Задання шарів CLT панелі в RFEM

В даній роботі використано ортотропні моделі матеріалу з редагуванням характеристик матеріалу C24 з бази даних задля приведення значень до таких, що використовувалися під час розрахунку в ПК ЛІРА-САПР. Товщини шарів панелі налаштовуються з врахуванням товщини та напрямку повороту кожного шару (Рис.4). На основі заданих шарів конструкції автоматично формується загальна матриця жорсткості панелі (Рис 5).

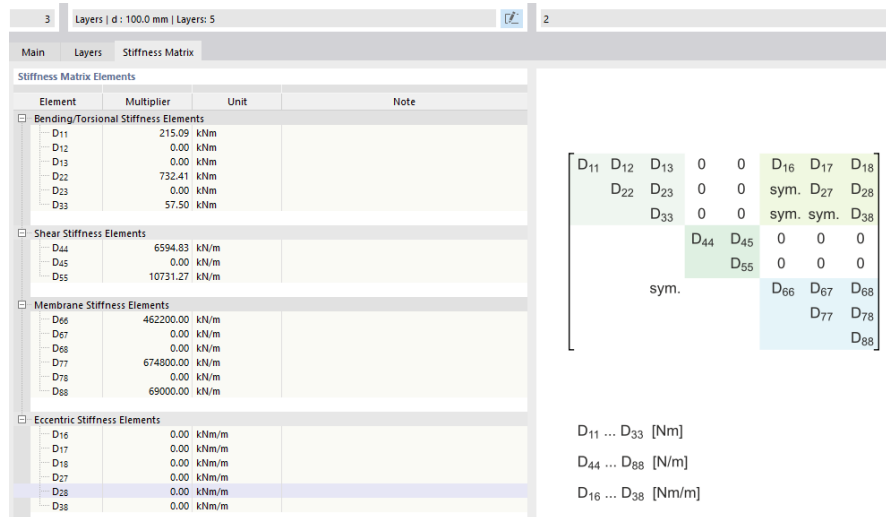


Рис.5 Матриця жорсткості CLT панелі в RFEM

Для дослідження та порівняння результатів розрахунку CLT панелей, в ПК RFEM було створено розрахункові схеми панелей аналогічних розмірів та з таким самим навантаженням, як для ПК ЛІРА-САПР (Рис. 6).

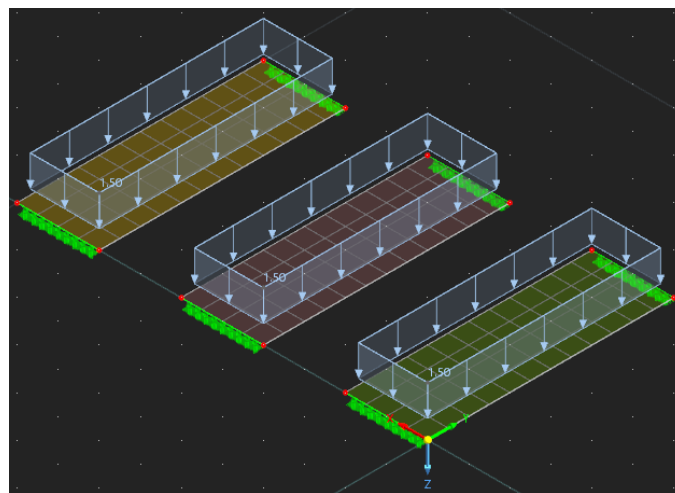


Рис.6 Загальний вид розрахункової схеми в Dlubal RFEM

Результати розрахунку вертикальних деформацій CLT панелей подано в таблиці 1. Проаналізовано розбіжність результатів розрахунку прогинів трьох типів CLT панелей: тришарової, п'ятишарової та семишарової, прольотом 6

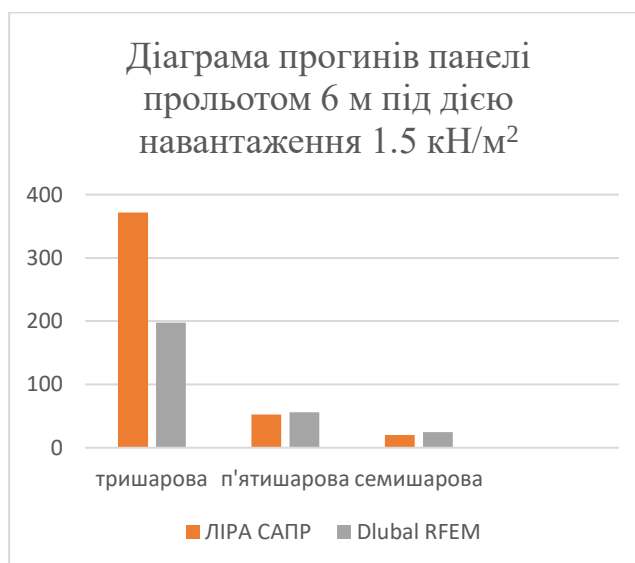
метрів при рівномірно-розподіленому навантаженні $1,5 \text{ кН/м}^2$, що становить: для тришарових панелей 87,6%, для п'ятишарових – 6,5%, для семишарових – 19,4%. Також графічно зображено значення прогинів при різних методах розрахунку у вигляді діаграми.

Таблиця 1

Значення прогинів для CLT панелей при рівномірно розподіленому навантаженні $1,5 \text{ кН/м}^2$

Кількість шарів	Метод розрахунку	Проліт, м	Розбіжність
		6	
		w, мм	
3-шарова	МСЕ №44 в ПК ЛІРА САПР	371,6	87,58%
	Dlubal RFEM	198,1	
5-шарова	МСЕ №44 в ПК ЛІРА САПР	52,57	6,46%
	Dlubal RFEM	56,2	
7-шарова	МСЕ №44 в ПК ЛІРА САПР	19,9	19,43%
	Dlubal RFEM	24,7	

На Рис.7 та Рис.8 подано порівняльні схеми з результатами розрахунку в програмних комплексах ЛІРА-САПР та Dlubal RFEM у вигляді ізополей вертикальних деформацій (прогинів) панелей прольотом 6 м при навантаженні $1,5 \text{ кН/м}^2$.



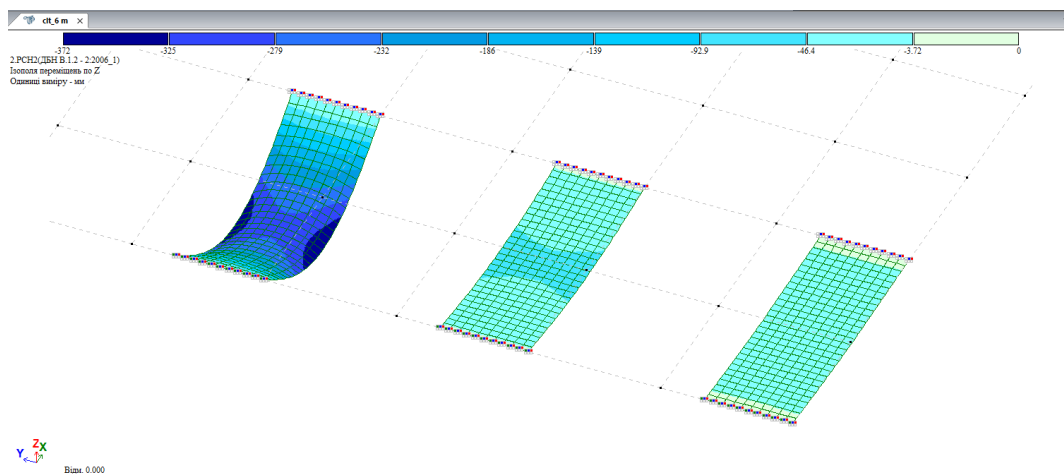


Рис.7 Ізополя вертикальних деформацій CLT панелей прольотом 6 метрів під дією навантаження 1,5 кН/м² в ЛІРА-САПР.

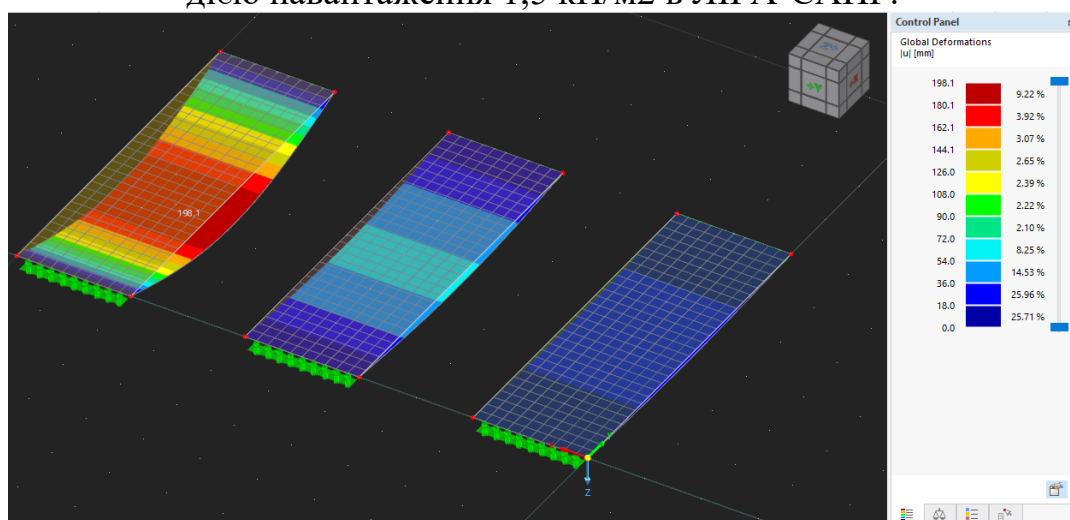


Рис.8 Ізополя вертикальних деформацій CLT панелей прольотом 6 метрів під дією навантаження 1,5 кН/м² в RFEM.

Висновки:

1.ПКД (поперечно клеєна деревина) або CLT (cross-laminated timber) представляє собою нову для України технологію будівництва, яка забезпечує надійність, стійкість, вогнестійкість та екологічність, а також вражаючі показники швидкості зведення будівель.

2. У даній роботі досліджено два методи розрахунку CLT панелей: використання вітчизняного програмного комплексу ЛІРА-САПР та програми RFEM 6 від компанії Dlubal. Згідно результатів розрахунку, найбільша розбіжність прогинів становить 87,6% для тришарових панелей, що свідчить про необхідність удосконалення методики розрахунку. Збіжність результатів для семишарових панелей – 19,4%. Моделювання п'ятишарових панелей в ПК ЛІРА-

САПР та RFEM показали збіжність результатів, що становить 6,5% та свідчить про оптимальну структуру панелі при даних методах розрахунку.

3. Для успішного впровадження будівництва за технологією масивного дерева (CLT) в Україні необхідна наукова та експериментальна база, а також практичні посібники для проектувальників.