

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛИТ З ПЕРЕХРЕСНО-КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ

Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ¹, Микола КОМАР², Олег КОМАР³

^{1,2,3}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

¹ mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630>

² komar_man@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

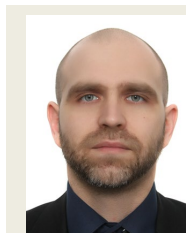
³ komar_oa-2023@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0009-0004-4507-9178>

Анотація. В наш час будівельна галузь активно розвивається в різних напрямках. Конструкції з великими поперечними перерізами витісняються аналогами зменшеними в перерізах за допомогою різного типу підсилення.

Плити з перехресно-клеєної деревини (ПКД) або *CLT* (*Cross Laminated Timber*) - це масивний, багат шарово-склеєний будівельний матеріал з деревини. У висотному будівництві споруд та будівель з використанням деревини, плити з ПКД є основними конструкціями для влаштування перекриттів та покриття. Шари пиломатеріалу склеюються між собою під тиском, утворюючи фактично монолітну плиту. Суміжні шари дерев'яних дошок зазвичай укладаються перпендикулярно один одному. Зовнішні шари зазвичай мають однакову орієнтацію, а внутрішні, перпендикулярні зовнішнім, можуть складатися з більш дешевої деревини з метою економії коштів. Найчастіше для виробництва таких плит використовується деревина хвойних порід, як найдоступніша.

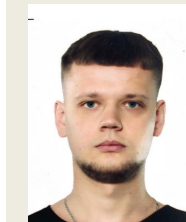
Проте виготовлення таких плит потребує значних витрат матеріалів. Тому актуальними є дослідження в сфері підсилення плит з ПКД для зменшення їхнього поперечного перерізу.

Композитні матеріали є передовими у підсиленні конструкцій зараз, оскільки більшість з них мають високу стійкість до різних хімічних впливів, таких як луги, кислоти, хлориди, сульфати, нітрати та інші. Це дозволяє їх використовувати як у промисловому та сільськогосподарському будівництві, де великий вплив зовнішнього середовища на конструкцію підсилену



Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ

професор кафедри металевих та дерев'яних конструкцій,
д.т.н., професор



Микола КОМАР

аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій



Олег КОМАР

аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

композитними матеріалами, так і в житлових будівлях, без шкоди для жителів.

Після аналізу напружено-деформованого стану шляхом моделювання в програмному комплексі ЛІРА САПР плит з ПКД підсиленних композитними стрічками та порівнюючи з аналогічними плитами без підсилення можемо зробити висновки, що такі матеріали можуть, чудово поєднуватись з конструкціями з перехресно-клеєної деревини, дозволяючи збільшити несучу здатність при зменшенні їхнього поперечного перерізу.

Ключові слова. Дерев'яні конструкції; перехресно-клеєна деревина; композитні матеріали; композитні стрічки; напружено-деформований стан; підсилення.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Cross Laminated Timber (CLT), або перехреслено-клеєна деревина (ПКД), виникла у Європі в середині 20-го століття, але його розвиток і популярність значно зросли в останні десятиліття. Початково ПКД була розроблена в Німеччині та Швейцарії як технологія для використання малоцінних частин деревини, таких як малі дерев'яні бруски та щільніші породи дерева.

Перші застосування ПКД були обмеженими, і використовувалися головним чином у промислових та комерційних будівлях, а також у житловому будівництві в Європі. Проте, з розвитком технологій виробництва, стандартів безпеки та усвідомлення важливості сталого будівництва, популярність ПКД почала стрімко зростати.

У 21-му столітті ПКД стала широко використовуваним будівельним матеріалом по всьому світу. Вона знаходить застосування в будівництві житлових будинків, громадських споруд, офісних комплексів та інших проектах. Величезні переваги у міцності, екологічності та швидкості монтажу зробили ПКД привабливим вибором для сучасних будівельних проектів, а його історія продовжує розвиватися з кожним новим застосуванням та технологічним вдосконаленням.

Об'єктом досліджень є плити з ПКД. Для висотного будівництва споруд та будівель з деревини, використання плит з ПКД є основним методом влаштування перекриттів та покриття. Детально про дослідження ПКД плит описано в [1].

Проте розміри ПКД плит можуть бути обмеженими через обмежену можливість транспортування або виробничі обмеження, що може вимагати додаткових з'єднань панелей на місці будівництва. Тому актуальними є дослідження в сфері підсилення таких плит для зменшення їхнього поперечного перерізу.

Композитні матеріали є одними з провідних в підсиленні конструкцій на даний час. В роботах [2-6] доведена доцільність використання таких матеріалів в різних сферах будівництва та детально описане поєднання композитних матеріалів з різного типу конструкціями.

В світі дослідження дерев'яних конструкцій підсиленних композитними матеріалами є дуже актуальною темою [7-19]. Проте використання композитних матеріалів з дерев'яними конструкціями практично не дослідженні в Україні. Виконані поодинокі дослідження підсилення дерев'яних балок композитною арматурою та композитними стрічками [20-24].

Данні дослідження аналізу напружено-деформованого стану плит з ПКД підсиленних композитними стрічками виконуються для вирішення ряду проблем:

1. Аналізу підсилення плит з ПКД композитними стрічками.
2. Дослідження впливу кількості стрічок підсилення на плити різного поперечного перерізу.
3. Поширення використання композитних стрічок з іншими конструкціями клеєної деревини окрім балок.

МЕТА РОБОТИ

Дослідити напружено-деформований стан плит з ПКД підсиленних композитними стрічками в порівнянні з ПКД плитами без підсилення за допомогою моделювання їх в ПК ЛІРА-САПР із використанням об'ємних СЕ та апробацією результатів через порівняння досліджуваних елементів з різною кількістю шарів самої плити та при різній кількості шарів композитних стрічок..

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом чисельних досліджень було обрано плити з ПКД прямокутних поперечних перерізів, склеєних з 3-х, 5-и, 7-и шарів дошок одного класу міцності з підсиленням 3-а (рис. 1 (б)) та 5-а, композитними стрічками (рис. 2 (б)) та без нього (рис. 1.(а), 2 (а)) на двох шарнірних опорах, габаритами $B \times H =$

1 м х 4 м, завантажених рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю 1 кН/м.

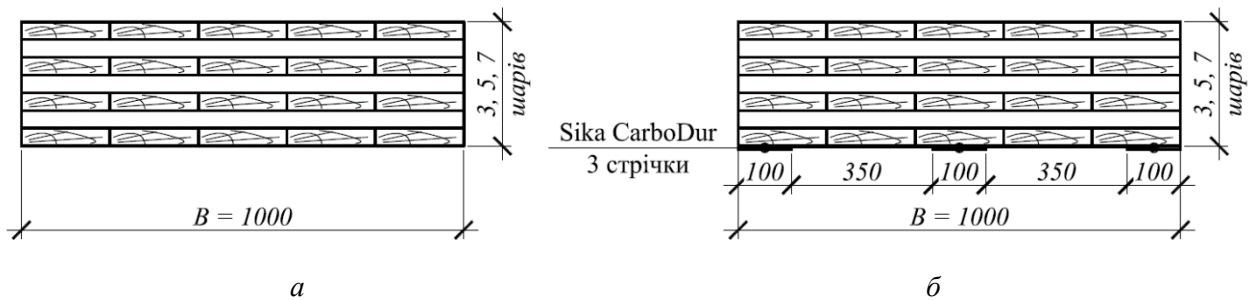


Рис.1. Геометрична схема поперечного перерізу плит з перехресно-клеєної деревини:
a - без підсилення;
б – підсилена 3-а композитними стрічками.

Fig.1. Geometric cross-section scheme of cross-laminated timber panels:
a - without reinforcement;
b – reinforced with 3 composite strips.

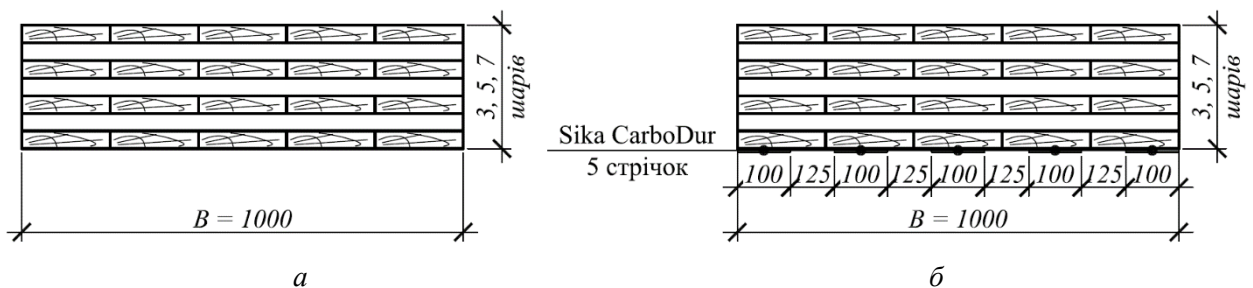


Рис.2. Геометрична схема поперечного перерізу плит з перехресно-клеєної деревини:
a - без підсилення;
б – підсилена 5-а композитними стрічками

Fig.2. Geometric cross-section scheme of cross-laminated timber panels:
a - without reinforcement;
b – reinforced with 5 composite strips.

В програмному комплексі ЛПА-САІР змодельовали плити з ПКД, поперечний переріз яких складається з 3-х, 5-и та 7-и шарів дошок деревини одного класу міцності С24, товщиною $t = 2$ см, які для чисельних досліджень, моделювались об'ємними скінченими елементами СЕ №36. Загальні розміри поперечних перерізів плит прийнято $B = 1000$ см, $H_1 = 6$ см, $H_2 = 10$ см, $H_3 = 14$ см, відповідно для кількості шарів в перерізі. Механічні властивості (модулі пружності деревини вздовж та поперек волокон, модуль зсуву та коефіцієнти Пуассона) поперечних перерізів плит які з модельовано СЕ №36, задавались окремо для повздовжніх та поперечних шарів дошок.

При моделюванні плит з підсиленням композитними стрічками *Sika CarboDur S1012*, які змодельовано об'ємними СЕ №36, додатково задавались їх механічні характеристики (модуль пружності вздовж волокон, коефіцієнти Пуассона).

За результатами чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД без підсилення композитними стрічками при обраних габаритах та висотою поперечного перерізу що складається з 3-х шарів дошок ($H_1 = 6$ см), при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м, отримали ізополі вертикальних деформацій (рис. 3) та ізополі максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 4).

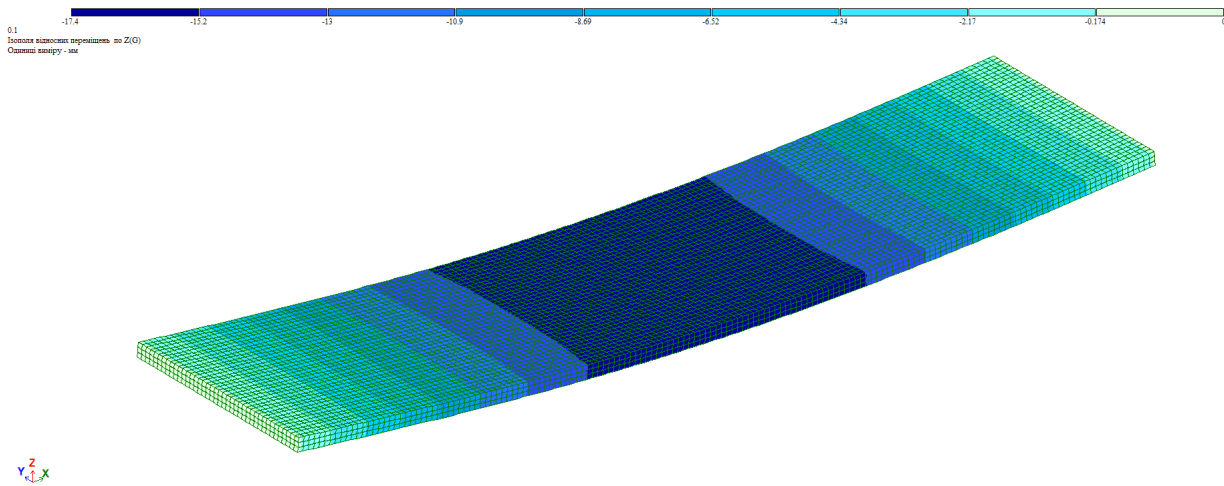


Рис.3. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу що складається з 3-х шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Fig.3. Isopleths of vertical deformations of cross-laminated timber panels without reinforcement with dimensions $B \times L = 1 \times 4$ m and a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards under uniformly distributed load of 1 kN/m.

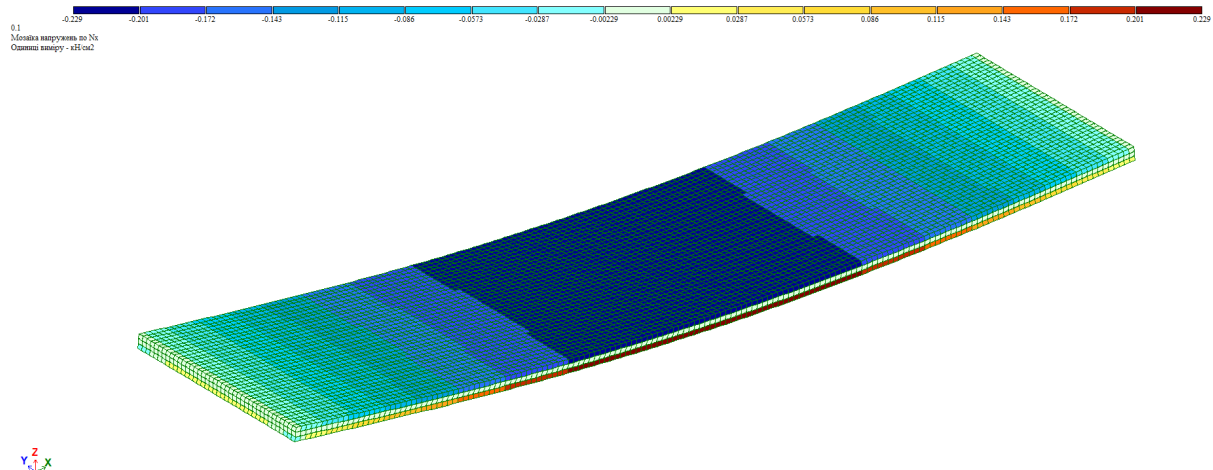


Рис.4. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу що складається з 3-х шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Fig.4. Isopleths of maximum normal stresses along the wood fibers of cross-laminated timber panels without reinforcement with dimensions $B \times L = 1 \times 4$ m and a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards under uniformly distributed load of 1 kN/m.

Відповідні ізополя вертикальних деформацій (рис. 5) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис.

б) при аналогічному навантаженні плит з ПКД з підсиленням 3-а композитними стрічками.

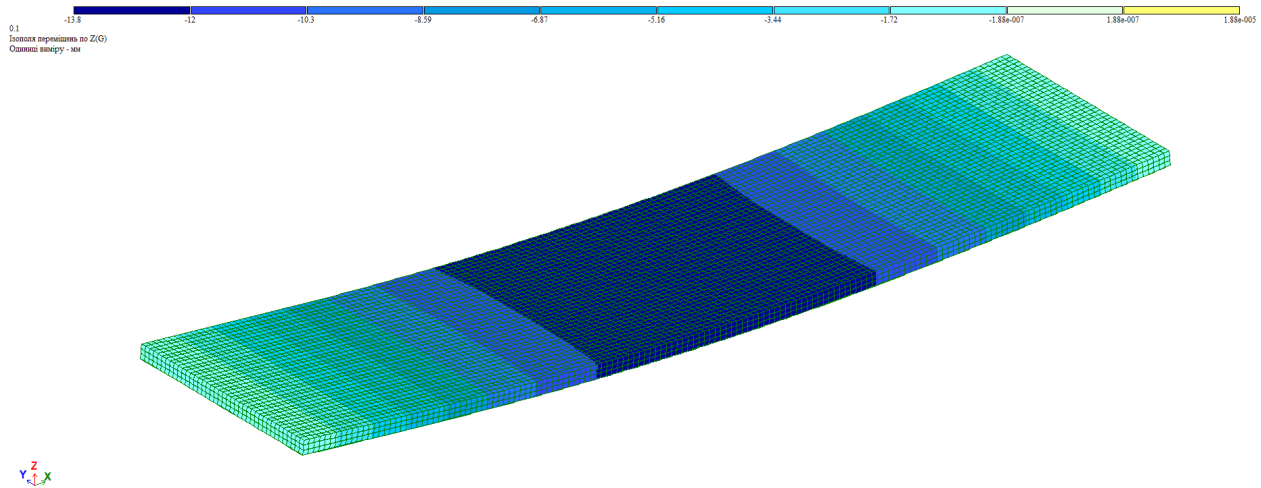


Рис.5. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням 3-а композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Fig.5. Isopleths of vertical deformations of cross-laminated timber panels reinforced with 3 composite strips with dimensions $B \times L = 1 \times 4$ m and a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards under uniformly distributed load of 1 kN/m

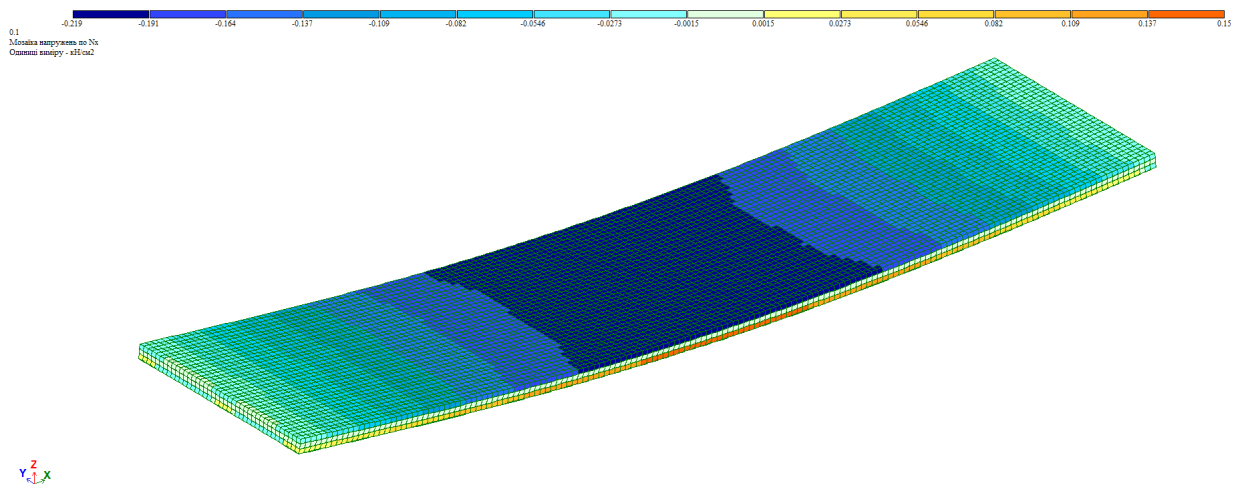


Рис.6. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням 3-а композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Fig.6. Isopleths of maximum normal stresses along the wood fibers of cross-laminated timber panels reinforced with 3 composite strips with dimensions $B \times L = 1 \times 4$ m and a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards under uniformly distributed load of 1 kN/m.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилених композитними стрічками та без підсилення висотою

поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 1.

Табл. 1. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для плит з ПКД підсилених композитними стрічками та без підсилення, висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Table 1. The values of vertical deformations w and maximum normal stresses $\sigma_{m,d}$ for cross-laminated timber panels reinforced with composite strips and without reinforcement, with a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards, under uniformly distributed load of 1 kN/m.

Товщина плити		Три шари дошок ($H_1 = 6$ см)	
Методики розрахунку	$EI (W_x)$, кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без підсилення	17,4	0,229
МСЕ з об'ємними СЕ №36	підсилена трьома композитними стрічками	13,8	0,15
Відсоткова різниця		20%	34%

Нижче наведено ізополі вертикальних деформацій (рис. 7) та ізополі максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 8) при аналогічному навантаженні на плити з ПКД з підсиленням 5-а композитними стрічками.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилених 5-ть композитними стрічками та без підсилення, висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.

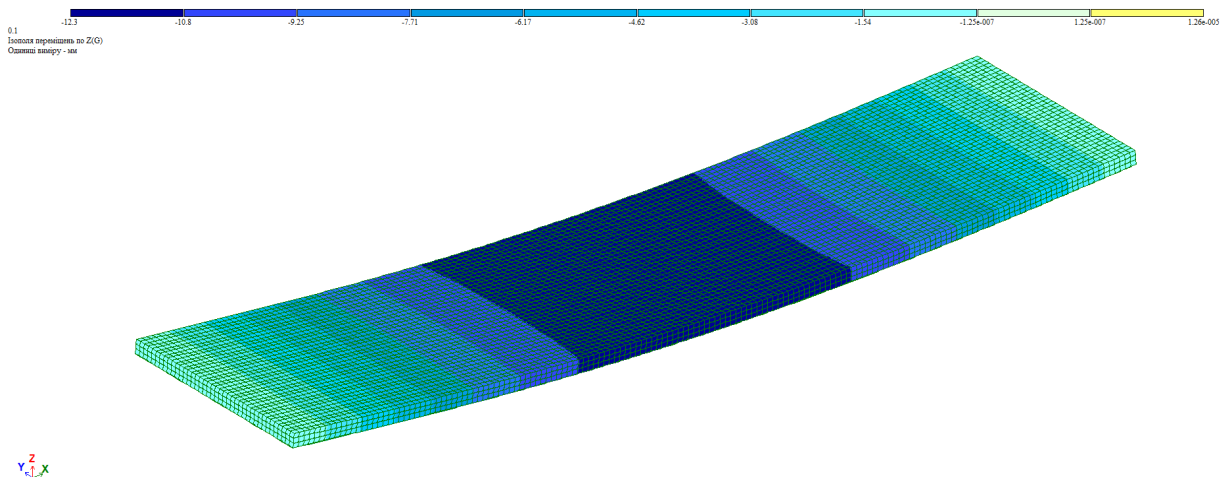


Рис.7. Ізополі вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням 5-а композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Fig.7. Isopleths of vertical deformations of cross-laminated timber panels reinforced with 5 composite strips with dimensions $B \times L = 1 \times 4$ m and a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards under uniformly distributed load of 1 kN/m.

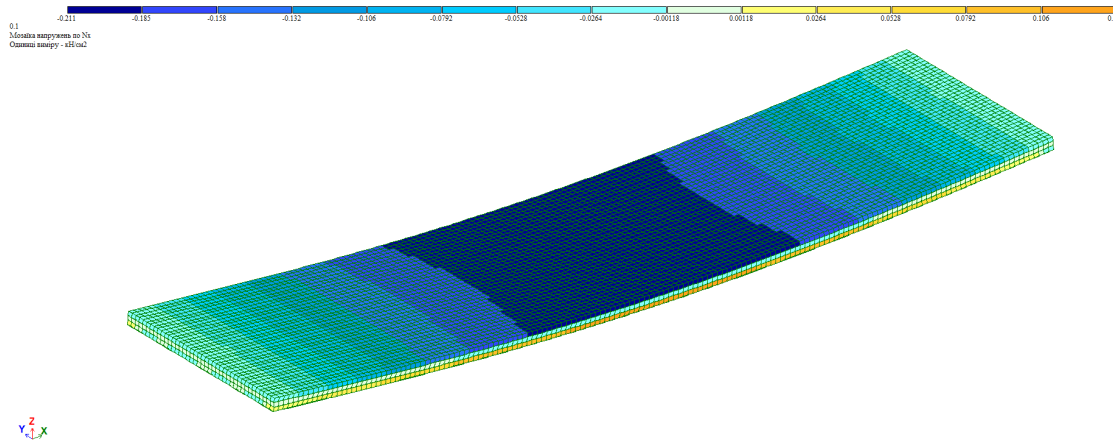


Рис.8. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням 5-а композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Fig.8. Isopleths of maximum normal stresses along the wood fibers of cross-laminated timber panels reinforced with 5 composite strips with dimensions $B \times L = 1 \times 4$ m and a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards under uniformly distributed load of 1 kN/m.

Табл. 2. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для плит з ПКД підсиленних композитними стрічками та без підсилення, висотою поперечного перерізу, що складається з 3-х шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Table 2. The values of vertical deformations w and maximum normal stresses $\sigma_{m,d}$, for cross-laminated timber panels reinforced with composite strips and without reinforcement, with a height of the cross-section consisting of 3 layers of boards, under uniformly distributed load of 1 kN/m.

Товщина плити		Три шари дошок ($H_1 = 6$ см)	
Методики розрахунку	$EI (W_x)$, кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без підсилення	17,4	0,229
МСЕ з об'ємними СЕ №36	підсилена п'ятьма композитними стрічками	12,3	0,118
Відсоткова різниця		29%	48%

З проведених чисельних досліджень зрозуміло, що для досліджуваних плит з клеєної деревини одного класу міцності, висотою поперечного перерізу що складається з 3-х шарів дошок ($H_1 = 6$ см) з підсиленням 3-а композитними стрічками при рівномірно розподіленому навантаженні в 1,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується більш ніж на 34%, ніж аналогічні балки без підсилення композитними стрічками. А переміщення таких плит при армуванні 3-а стрічками зменшується більш ніж на 20%. Відповідно для досліджуваних плит підсиленних 5-а композитними стрічками при аналогічному рівномірному навантаженні міцність на розтяг

збільшується більш ніж на 48%, а переміщення таких плит зменшились більш ніж на 29% відносно не підсиленних.

Більш детально розглянемо відсоткове відношення впливу підсилення на плити з ПКД за допомогою діаграм порівняння, де наведені відсотки зменшення вертикальних деформацій після підсилення 3-а та 5-а композитними стрічками (рис. 9) та відсоткове зменшення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД після підсилення 3-а та 5-а композитними стрічками (рис. 10).

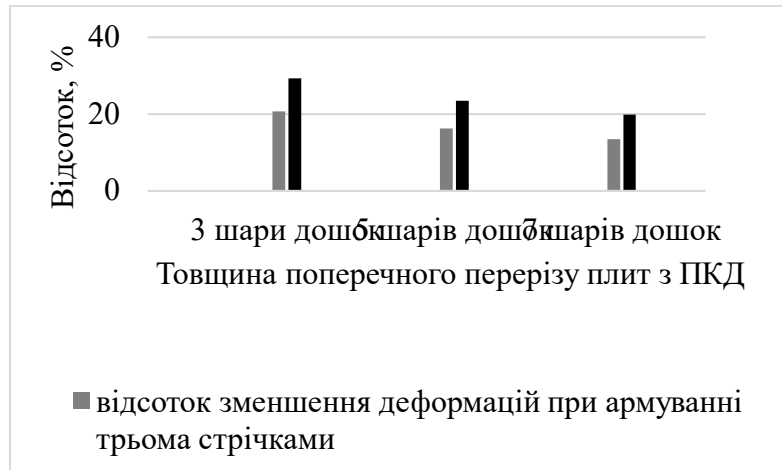


Рис.9. Діаграма відсоткового зменшення вертикальних деформацій після підсилення 3-а та 5-а композитними стрічками плит з ПКД різної товщини поперечного перерізу.

Fig.9. Diagram of the percentage reduction in vertical deformations after reinforcement with 3 and 5 composite strips of cross-laminated timber panels of different thicknesses of the cross-section

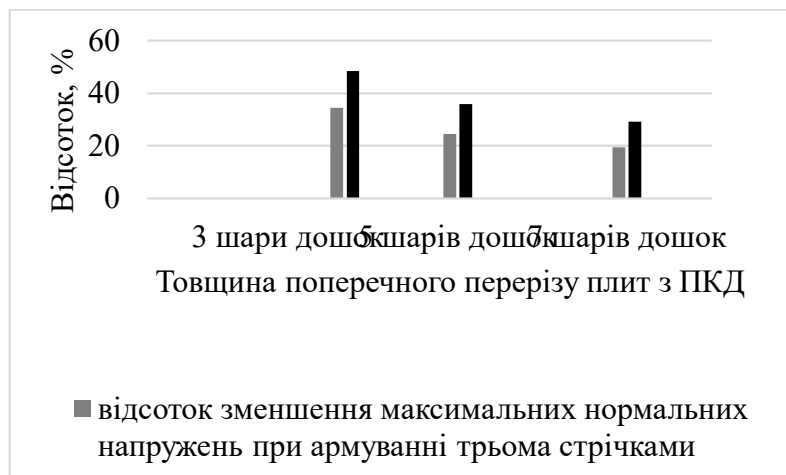


Рис.10. Діаграма відсоткового зменшення максимальних нормальних напружень вздовж волокон після підсилення 3-а та 5-а композитними стрічками плит з ПКД різної товщини поперечного перерізу.

Fig.10. Diagram of the percentage reduction in maximum normal stresses along the fibers after reinforcement with 3 and 5 composite strips of cross-laminated timber panels of different thicknesses of the cross-section

З наведених графіків зменшення вертикальних деформацій та максимальних нормальних напружень вздовж волокон після підсилення 3-а та 5-а композитними стрічками плит з ПКД різної товщини поперечного перерізу видно, що при збільшенні товщини поперечного перерізу, вплив підсилення на деформації плит з ПКД зменшується від більш ніж 20% до менш ніж 15% при армуванні 3-а композитними стрічками, та від майже 30% до менш ніж 25% при армуванні 5-а композитними стрічками. Щодо зменшення максимальних нормальних напружень

вздовж волокон після підсилення, то підсилення 3-а стрічками композитних стрічок зменшує від 35% до майже 20%, а підсилення 5-а композитними стрічками зменшує максимальні нормальні напруження від майже 50% до майже 30%.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Провівши аналіз напружено-деформованого стану шляхом моделювання в програмному комплексі ЛІРА САПР плит з ПКД підсиленних композитними стрічками та

порівнюючи з аналогічними плитами без підсилення можна зробити наступні висновки:

1. За розрахунком МСЕ в ПК ЛІРА-САПР плити з ПКД підсилені композитними стрічками з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012* мають в середньому на 20% більшу жорсткість та на 32% зменшують нормальні напруження в розтягнутих волокнах деревини від аналогічних плит з ПКД не підсилені композитними стрічками.

2. Підсилення плит з ПКД є більш ефективним для плит з меншим поперечним перерізом та відповідно до потреб будівництва можна збільшувати кількість композитних стрічок, які зменшують деформації та збільшують несучу здатність плит з ПКД.

3. Дані дослідження дозволяють розширити сферу застосування композитних стрічок як для нових плит з ПКД так і для підсилення вже існуючих.

4. В нормативних документах України [21] відсутні вказівки, щодо розрахунку та проектування конструкцій з ПКД підсилені композитними стрічками, тому дані дослідження можна використовувати для подальшої реалізації їх в нормативних документах.

Також, важливо зазначити, що моделювання композитних стрічок в програмному комплексі ЛІРА САПР потребує більш детальних досліджень для одержання точних результатів при їх сумісній роботі з дерев'яними конструкціями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайловський Д. В. (2022) Розрахунок панельних будинків з поперечно-клеєної деревини. *Монографія - К.: КНУБА, - 220 с.*
2. Panchenko, O., & Zhuravskiy, O. (2018). Оцінка міцності закріплення і обґрунтування способу наклеювання та анкерування композитної стрічки на бетон. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (2), 209–218. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.2.2018.209-218>
3. Yesypenko A., Bondar E., Sinyakin A., Panchenko A., & Pylypchuk O. (2021) Innovative organizational and technological solutions for extending the operational life of the chimney H = 270m with using “SIKA” materials. *Інноваційні технології в архітектурі і будівництві*, 414–420.
4. Руднева І. М. (2021) Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (8), 32 - 43. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43>
5. Birman V., Huang X., Nanni A., & Tunis G. (2003) Properties and potential for application of steel reinforced polymer (SRP) and steel reinforced grout (SRG) composites. *Internet. University, of Missouri-Rolla*, 27 p.
6. Зятюк Ю. Ю. (2016) Операційність технології виконання робіт при підсиленні дослідних залізобетонних зразків (матеріалами фірми SIKA). *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 466-475.
7. Juliano Fiorelli, & Antonio Alves Dias. (2003) Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Materials Research, Vol.6. (2)*, 193-202.
8. Mascia N. T., Bertoline C. A. A., Basaglia C. D., & Donadon B. F. (2018) Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by vectran fibers. *Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, (3), p. 359-373.* <http://doi.org/10.1590/s1678-6212018000300286>
9. Ümmü K Isleye, Rahim Ghoroubi, Omer Mercimek, Ozgür Anil, & Recep Tugrul. (2021) Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.40 (17-18)*, - 665-685. <https://doi.org/10.1177/0731684421997924>
10. Kawecki, B., & Sumorek, A. (2022) Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by CFRP plate. *Appl. Sci. 12, 10304.* <https://doi.org/10.3390/app122010304>
11. Dániel, H., Habashneh, M. & Rad, M.M. (2022) Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Sci rep 12*, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17751-6>
12. Vilela R., Mascia N. T., Donadon B. F., & Soriano J. (2023) Mechanical performance analysis in bending of glulam beams reinforced with synthetic vectran fibres. *Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, (4), p. 289-302.* <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400704>
13. Çankal D., Şakar G., & Çelik H. K. (2023) A

- criticism on strengthening glued laminated timber beams with fibre reinforcement polymers, numerical comparisons between different modelling techniques and strengthening configurations. *Revista de la construcción. Journal of construction*, 22(3), 661-678.
<https://doi.org/10.7764/RDLC.22.3.661> .
14. **Hala Younis, Haider Al Abadi, Vipulkumar Ishvarbhai Patel & Hossam Aboel Naga. (2024)** Finite element analysis of fibre reinforced timber beams under flexural loading. *Australian Journal of Structural Engineering*.
<https://doi.org/10.1080/13287982.2024.2346955>
 15. **Qing Chun, Koenraad Van Balen & Jianwu Pan. (2014)** Flexural performance of small fir and pine timber beams strengthened with near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer (nsm cfrp) plates and rods. *International Journal of Architectural Heritage*, 106-117.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2014.971195>
 16. **Ianasi, A. C. (2015)** On the role of cfrp reinforcement for wood beams stiffness. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/95/1/012015>
 17. **Karagöz İşleyen, Ü., & Kesik, H. İ. (2021)** Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with cfrp strips. *Structures*, 33, 259–271.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.070>
 18. **Śliwa-Wieczorek, K., Ostrowski, K. A., Jaskowska-Lemańska, J., & Karolak, A. (2021)** The influence of cfrp sheets on the load-bearing capacity of the glued laminated timber beams under bending test. *Materials*, 14 (14), 4019 .
<https://doi.org/10.3390/ma14144019>
 19. **Wdowiak-Postulak A. (2022)** Strengthening of Structural Flexural Glued Laminated Beams of Ashlar with Cords and Carbon Laminates. *Materials*, 15 (23), 8303.
<https://doi.org/10.3390/ma15238303>
 20. **Башинський О. І., Боднарчук Т.Б., & Пелешко М.З. (2014)** Несуча здатність та вогнестійкість дерев'яних балок армованих зовнішньою стрічковою арматурою. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. № 9. - С. 184-189.
 21. **Сурмай М.І. (2015)** Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою. *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук*. 185 с.
 22. **Гомон С., & Поліщук М. (2019)** Влаштування комбінованого армування балок із клеєної деревини. *Вісник Львівського Національного Аграрного Університету Архітектура і сільськогосподарське будівництво № 20* . ст. 44-49.
 23. **Bula, S., & Pelekh, A. (2023)** Comparing the efficiency of strengthening timber beams reinforced with carbon composite rods and plates. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (125)), 14–22.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287673>
 24. **Komar M.A., Komar O.A., Mykhailovskyi D.V. (2022)** Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. (109), 239-262.
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.239-262>
 25. **ДБН В.2.6-161:2017 (2017)** «Дерев'яні конструкції. Основні положення». Київ, "Укрархбудінформ", 125 с.

REFERENCES

1. **Mykhailovskyi D. V. (2022)** Rozrakhunok panelnykh budynkiv z poperechno-kleienoї derevyny. *Monohrafiia - K.: KNUBA*, - 220.
2. **Panchenko, O., & Zhuravskyi, O. (2018)**. Otsinka mitsnosti zakriplennia i obrhnutuvannia sposobu nakleiuvannia ta ankeruvannia kompozytnoi strichky na beton. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (2), 209–218.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.2.2018.209-218>
3. **Yesypenko A., Bondar E., Sinyakin A., Panchenko A., & Pylypchuk O. (2021)** Innovative organizational and technological solutions for extending the operational life of the chimney H = 270m with using “SIKA” materials. *Innovatsiini tekhnolohii v arkhitekturi i budivnytstvi*, 414-420.
4. **Rudnieva I. M. (2021)** Tekhnolohichni osoblyvosti pidsylennia metalevykh konstruksii fibroarovanykh system pry rekonstruksii. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (8), 32 - 43.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43>

5. **Birman V., Huang X., Nanni A., & Tunis G. (2003)** Properties and potential for application of steel reinforced polymer (SRP) and steel reinforced grout (SRG) composites. *Internet. University, of Missouri-Rolla*, 27 p.
6. **Ziatiuk Yu. Yu. (2016)** Operatsiunist tekhnologii vykonannia robit pry pidsylenni doslidnykh zalizobetonnykh zrazkiv (materialamy firmy SIKA). *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, 466-475.
7. **Juliano Fiorelli, & Antonio Alves Dias. (2003)** Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Materials Research, Vol.6. (2)*, 193-202.
8. **Mascia N. T., Bertoline C. A. A., Basaglia C. D., & Donadon B. F. (2018)** Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by vectran fibers. *Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, (3), p. 359-373*.
<http://doi.org/10.1590/s1678-6212018000300286>
9. **Ümmü K Isleye, Rahim Ghoroubi, Omer Mercimek, Ozgür Anil, & Recep Tugrul. (2021)** Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.40 (17-18)*, - 665-685.
<https://doi.org/10.1177/0731684421997924>
10. **Kawecki, B., & Sumorek, A. (2022)** Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by CFRP plate. *Appl. Sci. 12, 10304*.
<https://doi.org/10.3390/app122010304>
11. **Dániel, H., Habashneh, M. & Rad, M.M. (2022)** Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Sci rep 12*,
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-17751-6>
12. **Vilela R., Mascia N. T., Donadon B. F., & Soriano J. (2023)** Mechanical performance analysis in bending of glulam beams reinforced with synthetic vectran fibres. *Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, (4), p. 289-302*.
<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400704>.
13. **Çankal D., Şakar G., & Çelik H. K. (2023)** A criticism on strengthening glued laminated timber beams with fibre reinforcement polymers, numerical comparisons between different modelling techniques and strengthening configurations. *Revista de la construcción. Journal of construction, 22(3)*, 661-678.
<https://doi.org/10.7764/RDLC.22.3.661>.
14. **Hala Younis, Haider Al Abadi, Vipulkumar Ishvarbhai Patel & Hossam Aboel Naga. (2024)** Finite element analysis of fibre reinforced timber beams under flexural loading. *Australian Journal of Structural Engineering*.
<https://doi.org/10.1080/13287982.2024.2346955>
15. **Qing Chun, Koenraad Van Balen & Jianwu Pan. (2014)** Flexural performance of small fir and pine timber beams strengthened with near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer (nsm cfrp) plates and rods. *International Journal of Architectural Heritage*, 106-117.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2014.971195>
16. **Ianasi, A. C. (2015)** On the role of cfrp reinforcement for wood beams stiffness. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/95/1/012015>
17. **Karagöz İşleyen, Ü., & Kesik, H. İ. (2021)** Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with cfrp strips. *Structures*, 33, 259–271.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.070>
18. **Śliwa-Wieczorek, K., Ostrowski, K. A., Jaskowska-Lemańska, J., & Karolak, A. (2021)** The influence of cfrp sheets on the load-bearing capacity of the glued laminated timber beams under bending test. *Materials*, 14 (14), 4019 .
<https://doi.org/10.3390/ma14144019>
19. **Wdowiak-Postulak A. (2022)** Strengthening of Structural Flexural Glued Laminated Beams of Ashlar with Cords and Carbon Laminates. *Materials*, 15 (23), 8303.
<https://doi.org/10.3390/ma15238303>
20. **Bashynskiy O. I., Bodnarchuk T.B., & Peleshko M.Z. (2014)** Nesucha zdatnist ta vohnestiikist derevianyykh balok armovanykh zovnishnoiu strichkovoiu armaturoiu. *Visnyk lvivskoho derzhavnogo universytetu bezpeky zhyttiediialnosti. № 9. - S. 184-189*.
21. **Surmai M.I. (2015)** Mitsnist ta deformatyvnist doshchatokleienyykh balok armovanykh skloplastykovoiu ta bazaltovoiu armaturoiu. *dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk. 185 s.*
22. **Homon S., & Polishchuk M. (2019)** Vlashtuvannia kombinovanoho armuvannia balok iz kleienoi derevyny. *Visnyk lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo № 20 . s. 44-49*.

23. **Bula, S., & Pelekh, A. (2023)** Comparing the efficiency of strengthening timber beams reinforced with carbon composite rods and plates. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (125)), 14–22.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287673>
24. **Komar M.A., Komar O.A., Mykhailovskyi D.V. (2022)** Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. (109), 239-262.
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.239-262>
25. **DBN V.2.6-161:2017 (2017)** «Dereviani konstruktii. Osnovni polozhennia». Kyiv, "Ukrarkhbudinform", 125 s

ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF PLATES MADE OF CROSS-LAMINATED TIMBER REINFORCED WITH COMPOSITE TAPES

*Denis MYKHAYLOVSKYI,
Mykola KOMAR,
Oleg KOMAR*

Summary. In our time, the construction industry is actively developing in various directions. Constructions with large cross-sections are being replaced by counterparts with reduced cross-sections using various types of reinforcement.

Cross-laminated timber (CLT) panels are a massive, multi-layered glued timber construction material. For high-rise building structures and wooden buildings, the use of CLT panels is the primary

method for arranging floors and roofs. Layers of timber are glued together under pressure, forming a virtually ready-made panel. The layers of timber lamellas are laid perpendicular to each other, transversely. The outer layers usually have the same orientation, while the internal layers, perpendicular to the outer ones, may consist of cheaper wood to save costs. Most often, softwood is used for the production of such panels as the most affordable.

However, the production of such panels requires significant material costs. Therefore, research in the field of reinforcement of CLT panels to reduce their cross-section is relevant.

Composite materials are leading in structural reinforcement now, as most of them have high resistance to various chemical influences, such as alkalis, acids, chlorides, sulfates, nitrates, and others. This allows them to be used both in industrial and agricultural construction, where there is a significant impact of the external environment on structures reinforced with composite materials, and in residential buildings, without harm to residents.

After analyzing the stress-strain state through modeling in the LIRA CAD software package of CLT panels reinforced with composite strips and comparing them with similar panels without reinforcement, we can conclude that such materials can be excellently combined with cross-laminated timber structures, allowing to increase the load-bearing capacity while reducing their cross-section.

Keywords. Wooden structures; cross-laminated timber; composite materials; composite tapes; stress-strain state; reinforcement.

Стаття надійшла до редакції 17.04.24