

**ОПТИМІЗАЦІЯ АРМУВАННЯ CLT-ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ
ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ**

**OPTIMIZATION OF REINFORCEMENT IN CLT PANELS BASED ON
NUMERICAL STRESS-STRAIN ANALYSIS**

Михайловський Д.В., д.т.н., проф., (Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ), ORCID.ORG/0000-0003-3151-8630; **Гомон П.С., к.т.н., доц.,** ORCID.ORG/0000-0002-5312-0351; **Медвідь М.М., аспірант** ORCID.ORG/0009-0006-9632-8626, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне).

Mykhailovskyi D.V., Doctor of technical sciences, professor; (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv); **Gomon P. S., Candidate of technical sciences, associate professor;** **Medvid' M.M., PhD student** ORCID.ORG/0009-0006-9632-8626, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine)

Багатошарові панелі з перехресно-клесної деревини (CLT - англ. Cross-Laminated Timber) широко застосовуються у сучасному будівництві завдяки малій масі, жорсткості та технологічності монтажу. Для підвищення ефективності їхньої роботи у практиці використовують армування, яке здатне зменшувати прогини та напруження, проте водночас зумовлює локальні концентрації сколюючих (дотичних) напружень у деревині. У статті наведено результати чисельного моделювання CLT-панелей з різними рівнями армування (0,5–1,25%) із використанням програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024 на основі методу скінченних елементів із врахуванням анізотропії деревини. Розглянуто п'яти шарові плити товщиною 10 см і кроком арматури 20 см. Показано, що введення арматури забезпечує суттєве зниження вертикальних переміщень (до 60%) і повздовжніх напружень (більше ніж удвічі). Встановлено спадний характер впливу збільшення відсотка армування на зменшення прогинів та напружень, що свідчить про наявність умовної оптимальної межі армування. Разом із тим виявлено зростання локальних дотичних напружень у зоні арматури, що потребує врахування при конструюванні. Наведені результати підтверджують доцільність застосування чисельного моделювання для оцінки ефективності армування CLT-панелей та можуть бути використані при оптимізації їхньої конструкції.

Cross-laminated timber (CLT) panels have gained widespread adoption in modern construction due to their combination of low weight, high stiffness, dimensional stability, and ease of assembly. Despite these advantages, their

load-bearing capacity and deformation behavior largely depend on the internal structure and mechanical properties of wood, which is inherently anisotropic. To enhance the structural performance of CLT panels, reinforcement is commonly applied, which can significantly reduce deflections and longitudinal stresses, while simultaneously generating local concentrations of shear stresses near the reinforcing elements. This study presents detailed results of numerical modeling of CLT panels with varying reinforcement ratios (0.5%, 0.75%, 1.0%, and 1.25%) using the LIRA-SAPR 2024 software package based on the finite element method. The modeling accounted for wood anisotropy and employed both volumetric and rod finite elements. Panels with a total thickness of 10 cm, composed of five layers of boards arranged at 90° to adjacent layers, and a reinforcement spacing of 20 cm were analyzed. The results demonstrate that the introduction of reinforcement substantially reduces vertical displacements (up to 60%) and longitudinal stresses (over twofold) compared to unreinforced panels. However, the influence of increasing the reinforcement ratio on further deflection and stress reduction exhibits a diminishing effect, suggesting the existence of a conditionally optimal reinforcement level. In addition, local shear stress concentrations around the reinforcement were identified, which must be carefully considered during the design process to prevent potential local failures. The findings confirm the effectiveness of numerical finite element modeling for assessing the structural performance of reinforced CLT panels and provide practical guidance for optimizing their reinforcement design, contributing to safer and more efficient timber construction solutions.

Ключові слова:

Перехресно-клеєна деревина, згин, армування панелей із перехресно-клеєної деревини, ефективне армування, чисельне дослідження
Cross-Laminated Timber, bending, CLT reinforcement, effective reinforcement, numerical study

Вступ. Багатошарові панелі із перехресно-клеєної деревини (CLT) набувають широкого застосування в сучасному будівництві (3-7) завдяки малій масі, високій жорсткості та технологічності монтажу. Водночас їхня несуча здатність і деформативні властивості визначаються структурою та механічними характеристиками деревини, як анізотропного матеріалу. Для підвищення ефективності роботи CLT-панелей у практиці застосовують армування, яке здатне зменшувати прогини та знижувати рівень напружень, але водночас спричиняє локальні концентрації напружень у зоні контакту арматурних елементів із деревиною.

Слід зазначити, що у науковій літературі вже опубліковані чисельні дослідження щодо поведінки інших видів дерев'яних конструкцій — зокрема балок з клеєної деревини (8-12), арок, рам (13-14) і крокв'яних конструкцій, які підтверджують ефективність застосування методу скінчених елементів (МСЕ) для моделювання з подальшою оцінкою їхнього напружено-

деформованого стану. Це створює передумови для обґрунтованого використання аналогічних методів при аналізі армованих CLT-панелей.

Слід зазначити, що чинні в Україні норми проєктування [1, 2] не містять рекомендацій щодо армування конструкцій з цільної, клеєної та поперечно-клеєної деревини. Враховуючи ефективність даного конструктивного прийому, армування конструкцій з цільної, клеєної та поперечно-клеєної деревини потребує унормування для можливості практичного широкого впровадження.

Основна частина. Як інструмент, для аналізу роботи армованої CLT-панелі було застосовано програмний комплекс ЛПА-САПР 2024, що використовує МСЕ. Функціонал комплексу дає змогу визначати переміщення та напруження з використанням різних типів скінченних елементів. Важливим моментом є можливість задати анізотропію в скінченному елементі, що є принциповим для деревини, як анізотропного матеріалу. Перед вибором цього програмного комплексу було проведено низку досліджень і співставлення результатів, отриманих у ЛПА-САПР, з даними експериментів та альтернативних методик. Комплекс показав високу збіжність результатів, що й зумовило його застосування для аналізу роботи CLT-панелей.

У чисельному моделюванні використовувалися об'ємні скінченні елементи та стержневі скінченні елементи. Для об'ємних елементів застосовано СЕ № 36. У розрахунку розглядалися CLT-панелі товщиною 10 см, сформовані з п'яти шарів дощок, склеєних під кутом 90° між суміжними шарами. Геометричні розміри плити становили 3 м завдовжки та 1 м завширшки. Зовнішні та центральний шари орієнтовані волокнами вздовж довшої сторони плити (див. рис. 1). Для виготовлення панелей використовувались дошки перерізом 2×10 см.

Попередні роботи показали, що ефективний рівень армування дерев'яних конструкцій становить 1–1,5 % для балок, виконаємо перевірку для CLT панелей. Для дослідження впливу відсотку армування приймалися значення в 0,5%, 0,75%, 1,0% та 1,25%. У кожному варіанті визначали діаметр арматурних стержнів таким чином, щоб забезпечити відсоток армування. Крок розташування прийнятий в 20 см. Розраховані діаметри й площі арматури для кожного варіанта наведено в табл. 1. Для розрахунку панелей використано фізико-механічні характеристики цільної деревини згідно [2] класу міцності С24: 1) модуль пружності вздовж волокон $E_{0,CLT,mean} = 11000$ МПа; 2) модуль пружності поперек волокон $E_{90,CLT,mean} = 360$ МПа; 3) модуль зсуву $G_{0,lay,mean} = 500$ МПа; 4) коефіцієнт Пуассона $\nu_{90} = 0,018$ та $\nu_0 = 0,48$. Об'ємний скінченний елемент, в якому моделювалась деревина, мав розмір: ширина 5 см, довжина 5 см та висота 2 см.

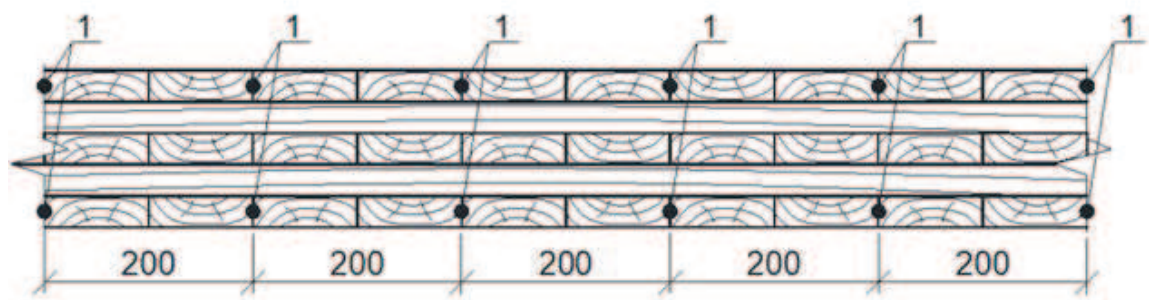


Рис. 1. Поперечний переріз та армування CLT-панелі з кроком арматури.
(1- арматура з варіацією згідно табл. 1)

Для армування в моделі були прийняті стержневі скінченні елементи між вузлами скінченних елементів самої деревини. Довжина стержневих скінченних елементів складала 5 см. Площа стержнів та діаметр стержнів для панелей наведено в таблиці 1. Розміщення арматурних стержнів в поперечному перерізі показано на рисунку 1.

Таблиця 1.

Варіація армування

Варіант армування	Відсоток армування, %	Площа поперечного перерізу, см ²	Діаметр арматури, см
Варіант -1	0,5	0,833	1,030
Варіант -2	0,75	1,250	1,262
Варіант -3	1,0	1,667	1,457
Варіант -4	1,25	2,083	1,629

У моделі до плити були накладені в'язі, які обмежували рух плити в горизонтальному і вертикальному напрямках, в приопорних вузлах скінченних елементів з лівої сторони плити та обмежували рух опорних вузлів лівої частини у вертикальному напрямку. Також, щоб запобігти обертанню відносно вертикальної осі плита була розкріплена в двох крайніх вузлах. На плиту прикладалось рівномірно-розподілене навантаження $q_s = 10 \text{ кН/м}^2$. Розрахункова схема навантаження зображена на рисунку 2. Після прикладання навантаження було проведено розрахунки панелей.

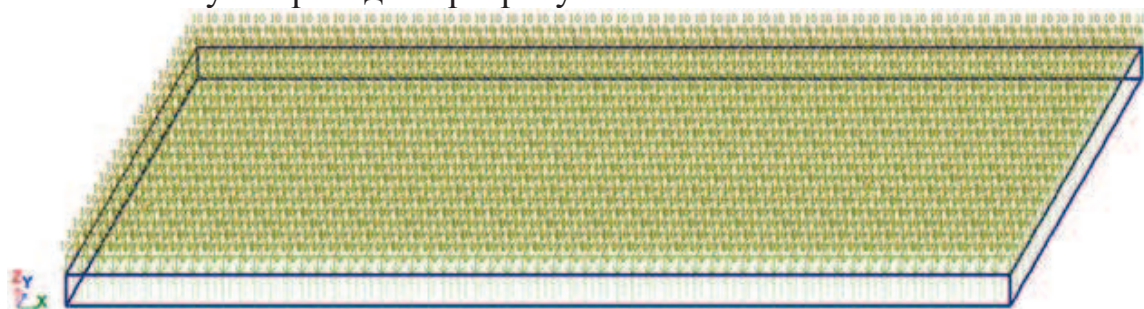


Рис. 2. Розрахункова схема CLT панелі

Результати дослідження. Отримані результати чисельного експерименту, який проводився за допомогою ПК ЛІРА САПР. Ізополя вертикальних переміщень та повздовжніх напружень в деревині показані на рис. 3. В порівнянні армованої плити з неармованою плитою видно значне зменшення прогинів, а саме з 13,2 мм до 5,23 мм. Проте з результатів видно, що збільшення армування викликає спадаючий ефект на зменшення вертикальних переміщень. Якщо при першому варіанті зменшення вертикальних переміщень складає 4,01 мм, то для четвертого варіанту 7,92 мм, проте площа зросла в 2,5 разів. Так само, як і для прогинів, армування зменшує напруження в деревині. Максимальні повздовжні напруження в деревині для неармованої панелі склали 7,49 МПа, а для армованої близько 2,93 МПа при 4 варіанті армування. В зменшенні поперечних напружень спостерігається, такий же спадаючий ефект при збільшенні армування рисунок 5.

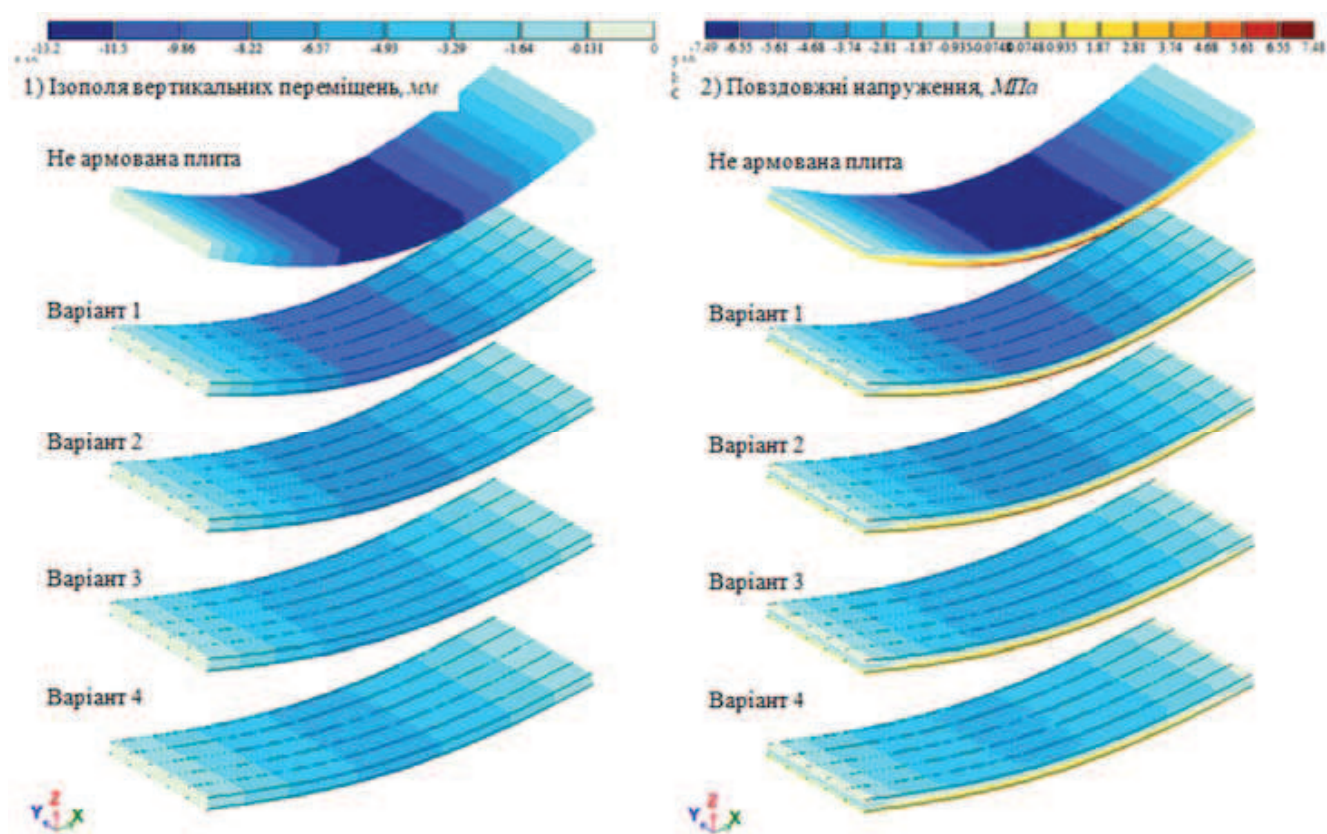


Рис. 3. Результати чисельного дослідження армованої CLT панелі з різними варіантами армування: 1) ізополя вертикальних переміщень; 2) ізополя повздовжніх напружень

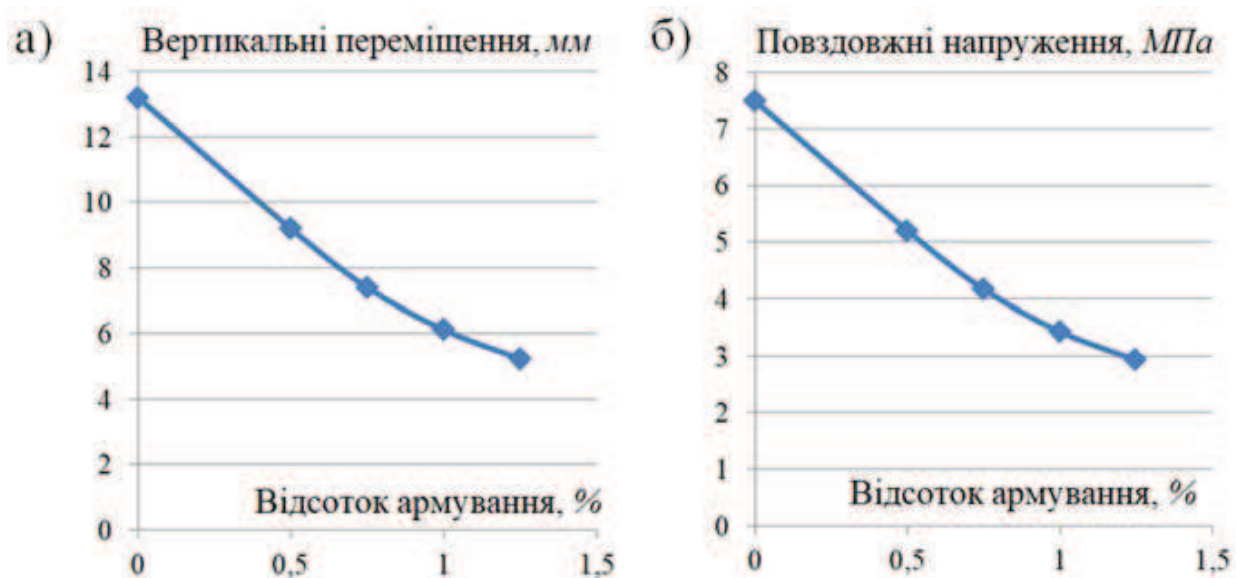


Рис. 5. Графік залежності переміщень (а) та повздовжніх напружень (б) від армування

На відміну від прогинів та повздовжніх напружень, збільшення діаметру арматури значно впливає на сколюючі (дотичні) напруження рисунок 6. З рисунку видно появу концентрацій дотичних напружень біля арматури. Результати отримані шляхом чисельного моделювання панелей занесені до таблиці 2.

Таблиця 2.

Результати чисельного дослідження

Варіант армування	Максимальне вартикальне переміщення, см	Максимальні повздовжні напруження, МПа	Максимальні напруження зрізу в площині ху, МПа	Максимальні напруження зрізу в площині хz, МПа
Без армування	13,2	7,49	0,029	0,279
Варіант -1	9,19	5,20	0,180	0,364
Варіант -2	7,39	4,17	0,259	0,388
Варіант -3	6,11	3,43	0,310	0,4
Варіант -4	5,23	2,93	0,341	0,406

В процесі аналізу дотичних напруг виявлена нелінійна залежність дотичних напружень від відсотку армування. Дотичні напруження при встановленні арматури з відсотком армування 0,5 збільшуються на 0,151 МПа в площині ху та на 0,0085 МПа в площині хz. При цьому різниця між відсотком армування 1,0 та 1,25 складає, 0,021 МПа та 0,006 МПа відносно відповідних площин зрізу. Тому, можна стверджувати, що при збільшенні кількості арматури ріст дотичних напружень зменшується. На нашу думку, при цьому

збільшується ризик появи роликового зсуву, для запобігання якого при армуванні стиснутої і розтягнутої зон варто розглянути питання додаткового армування перпендикулярно площині xu , що потребує проведення додаткових досліджень.

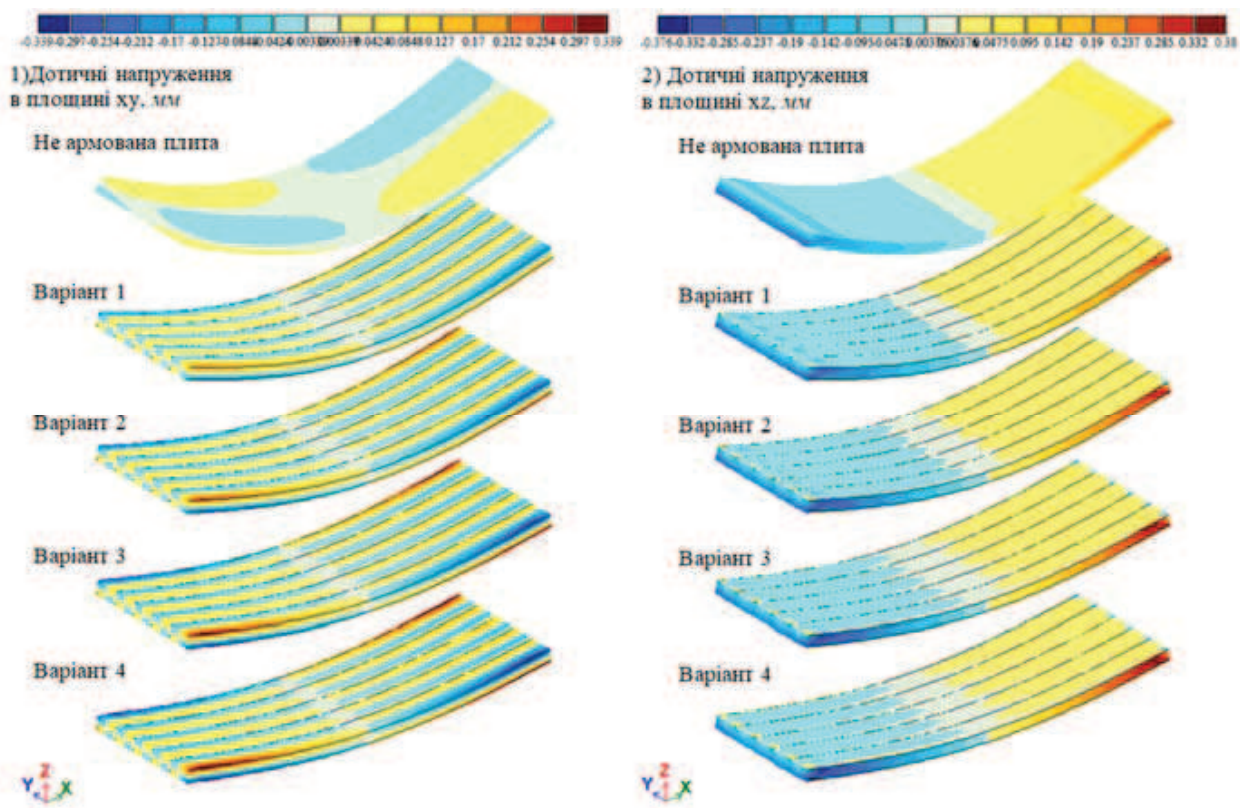


Рис. 6. Результати чисельного дослідження армованої CLT панелі ізополя дотичних напружень відносно площини: 1) xu ; 2) xz .

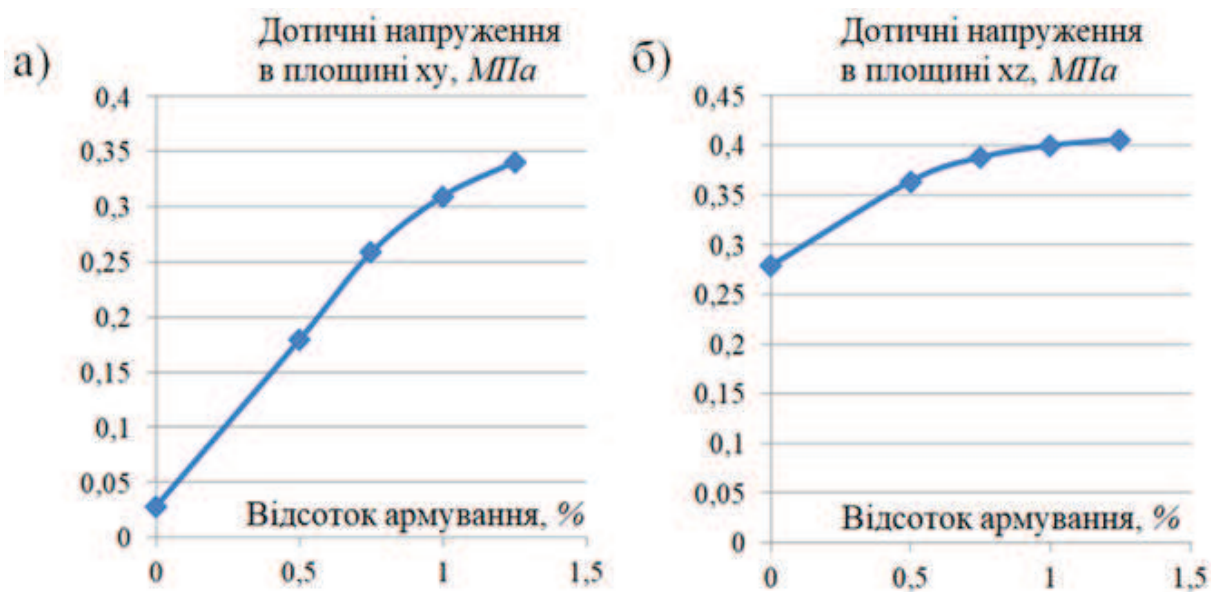


Рис. 7. Графік залежності дотичних напружень для CLT панелі в площині xu (а) та в площині xz (б) від відсотка армування

Висновки.

1. За результатами проведених чисельних досліджень встановлено, що армування помітно зменшує прогини та повздовжні напруження. Вертикальні переміщення у порівнянні з неармованою панеллю зменшуються на 30% до 60% залежно від рівня армування. Повздовжні напруження також суттєво знижуються і залежать від відсотку армування панелі.

2. Зі збільшенням відсотка армування ефект зменшення деформацій має спадний характер. Встановлення арматури забезпечує суттєве зменшення прогинів, однак подальше збільшення площі арматури не пропорційне приросту жорсткості, що свідчить про наявність умовно-оптимальної межі армування.

3. Армування спричиняє концентрації локальних сколюючих (дотичних) напружень у зоні встановлення арматури. Із зростанням діаметра стержнів збільшуються сколюючі (дотичні) напруження у деревині поблизу арматурних елементів, що потребує додаткового аналізу на стадії конструювання для уникнення локальних зон руйнування.

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 “Конструкції з цільної і клеєної деревини. Настанова з проектування” - Київ, “Укрархбудінформ” 2013. – 120с.

DSTU-N B V.2.6-184:2012. Konstruktsii z tsilnoi i kleienoi derevyny. Nastanova z proektuvannia. – Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2013. – 120 s.

2. ДБН В.2.6-161:2017 “Дерев’яні конструкції. Основні положення - Київ, “Укрархбудінформ” 2017. – 111 с.

DBN V.2.6-161:2017. Dereviani konstruktsii. Osnovni polozhennia. – Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2017. – 111 s.

3. Михайловський Д.В. Розрахунок панельних будинків з поперечно-клеєної деревини. Київ: КНУБА, 2022.

Mykhailovs'kyi D.V. Rozrakhunok panel'nykh budynkiv z poperechno-kleiēnoi derevyny. Kyiv: KNUBA, 2022.

4. Younis, A. (2022). Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle assessment approach. Materials Today: Proceedings, 2022.

5. Johns, D. (2024). Assessing the effectiveness of cross-laminated timber (CLT) flat roof systems: Moisture mitigation and control strategies. Building and Environment, 2024.

6. Bayramoglu, M. M. (2025). Effect of lumber quality grade on the mechanical properties and product costs of cross-laminated timber panels. Bioresources, 2025.

7. Михайловський Д.В., Матющенко Д.Н., Смоленський А.О. Застосування деревини та деревинних матеріалів у будівництві. Нові технології в будівництві, 2021.

Mykhailovs'kyi D.V., Matiushchenko D.N., Smolens'kyi A.O. Zastosuvannia derevyny ta derevynnykh materialiv u budivnytstvi. Novi tekhnolohii v budivnytstvi, 2021.

8. Михайловський Д.В., Матющенко Д.Н. Чисельне моделювання деформування армованих дерев’яних балок з цільної та клеєної деревини. Наукові праці Одеського політехнічного університету. 2016. №2(49). С. 45–53.

Mykhailovs'kyi D.V., Matiushchenko D.N. Chysel'ne modeliuвання deformuvannia armovanykh derev'ianykh balok z tsil'noi ta kleienoi derevyny. Naukovi pratsi Odes'koho politekhnichnoho universytetu, 2016, №2(49), p. 45–53.

9. Михайловський Д.В., Комар М.А., Гомон П.С. Чисельне моделювання роботи комбіновано армованої дерев'яної балки за допомогою плоских скінченних елементів. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. Одеса: ОДАБА, 2025. Вип. № 29. С. 130-141.

Mykhailovskyi D.V., Komar M.A., Homon P.S. Chyselne modeliuвання roboty kombinovano armovanoi derev'ianoї balky za dopomohoiu ploskykh skinchennykh elementiv. Suchasni budivelni konstruktsii z metalu ta derevyny. Odesa: ODABA, 2025. Vyp. № 29. S. 130–141.

10. Михайловський Д.В., М.А. Комар, П.С. Гомон. Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк: ЛНТУ, Випуск 23, 2025, С. 155-170.

Mykhailovskyi D.V., Komar M.A., Homon P.S. Chyselne modeliuвання deformuvannya armovanykh derev'ianykh balok z tsil'noi ta kleienoi derevyny. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Lutsk: LNTU, Vyp. 23, 2025, S. 155–170.

11. Denys Mykhailovskyi, Oleg Komar, Mykola Komar Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes / Опір матеріалів і теорія споруд / Strength of Materials and Theory of Structures: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 239-262.

12. Гомон П.С. Моделювання роботи поперечних перерізів дерев'яних елементів за різних варіантів та відсотків армування. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. Київ: КНУБА, 2022. Вип. 64. С. 334-342.

Homon P.S. Modeliuвання roboty poperechnykh pereriziv derev'ianykh elementiv za riznykh variantiv ta vidsotkiv armuvannya. Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya. Kyiv: KNUBA, 2022. Vyp. 64. S. 334-342.

13. Шилин А. В., Руднева І. В., Бірман В. І. Армування дерев'яних конструкцій композитними матеріалами: стан і перспективи / А. В. Шилин, І. В. Руднева, В. І. Бірман // Будівельні конструкції. Теорія і практика. – 2022. – Вип. 11. – С. 85-94.

Shylyn A.V., Rudnieva I.V., Birman V.I. Armuvannya derev'ianykh konstruktsii kompozytnymy materialamy: stan i perspektyvy / A.V. Shylyn, I.V. Rudnieva, V.I. Birman // Budivelnі konstruktsii. Teoriia i praktyka. – 2022. – Vyp. 11. – P. 85–94.

14. Михайловський Д.В., Комар М. Аналіз напружено-деформованого стану ламано-клеєних тришарнірних рам з клеєної деревини, підсилених композитними стрічками, за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 2022, №11, с. 54–58.

Mykhailovs'kyi D.V., Komar M. Analiz napriazhenno-deformovanoho stanu lamano-kleiēnykh trysharniŋnykh ram z kleienoi derevyny, pidsylenykh kompozytnymy strichkami, za dopomohoiu prohrannoho kompleksu LIRA-SAPR. Budivelnі konstruktsii. Teoriia i praktyka, 2022, №11, p. 54–58.