

Київський національний університет будівництва і архітектури

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОМАР МИКОЛА АНТОНОВИЧ

УДК 69.07

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОНСТРУКЦІЇ З КЛЕСНОЇ ТА ПЕРЕХРЕСНО-КЛЕСНОЇ ДЕРЕВИНИ
ПІДСИЛЕНІ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ**

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ М. А. Комар

Науковий керівник – Михайловський Денис Віталійович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Комар М. А. Конструкції з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилені композитними стрічками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, галузь знань 19 – Архітектура та будівництво. – Київський національний університет будівництва і архітектури. Міністерство освіти і науки України, Київ, 2024 р.

Основний зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота спрямована на збільшення несучої спроможності конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини при зменшенні їхнього поперечного перерізу, для розширення сфери застосування таких конструкцій та сприянню впровадження екологічного міського простору.

За результатами виконаних оглядів, аналізів, скінченно-елементних та експериментальних досліджень:

- проведено аналіз існуючих методик розрахунку елементів конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилені композитними матеріалами;
- досліджено дійсний напружено–деформований стан конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилені композитними стрічками за допомогою комп’ютерного моделювання з застосуванням методу скінчених елементів в програмному комплексі;
- проведено експериментальне дослідження напружено-деформованого стану балок з клеєної деревини підсилені композитними стрічками;
- удосконалено методику розрахунку елементів з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилені композитними стрічками;
- надано рекомендації, щодо алгоритмів виробництва конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини композитними стрічками;

З точки зору філософії науки, сучасний світ зазнає все більшого науково-технічного прогресу. Людство створює складні системи для задоволення своїх потреб, таких як створення комфортного середовища для проживання та різних видів діяльності. Однак, зі зростанням складності цих систем зростає й їхня вразливість до непередбачуваних загроз різної природи. Наукові дослідження в галузі проектування будівель повинні бути спрямовані на підвищення безпеки людської життєдіяльності, конструктивної безпеки, екологічності та енергоефективності.

В першому розділі проведений аналіз сучасного стану досліджень армованих дерев'яних конструкцій, з якого стає зрозумілим необхідність детального вивчення таких конструкцій підсилених композитними стрічками. На теперішній час в Україні практично відсутні дослідження спільної роботи композитних стрічок з дерев'яними конструкціями, та їхній взаємний вплив, що унеможлиблює розробку інженерної методики розрахунку, проте в світі, в цей час, активно проводять такі дослідження, що доводить їхню актуальність. Практичні рекомендації з проектування дерев'яних конструкцій з армуванням композитними стрічками на даний час в Україні відсутні, тому їх розробка є вкрай необхідною і призведе до збільшення застосування таких конструкцій в будівлях та спорудах різного призначення.

У другому розділі проведений аналізу чисельних досліджень напружено-деформованого стану конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками в програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР методом скінченних елементів (СЕ). Доведено, що балки з клеєної деревини підсилені композитними стрічками мають в середньому на 18% менші вертикальні деформації та на 27% менші нормальні напруження від аналогічних балок з клеєної деревини не підсилених композитними стрічками. Рами з клеєної деревини підсилені композитними стрічками мають в середньому на 39% менші вертикальні деформації та в середньому на 57% менші максимальні нормальні напруження в розтягнутій зоні ригелів. Плити з перехресно-клеєної деревини

(ПКД) підсилені композитними стрічками мають в середньому на 20% менші вертикальні деформації та на 32% менші нормальні напруження від аналогічних плит з ПКД не підсилених композитними стрічками. Проте окремого вивчення потребує підбір універсального методу чисельного моделювання конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини в програмних комплексах.

В третьому розділі описано експериментальні дослідження повно розмірного зразка балки з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками. За результатами проведеного аналізу напружено-деформованого стану балки з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками за результатами експерименту встановлено, що визначення механічних властивостей деревини при згині, методом випробування зразків деревини з однієї партії, дає достовірне значення модулю пружності для застосування його в розрахунку реальних конструкцій. Наведено алгоритм проведення експериментальних досліджень балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками за допомогою електротензометрії. Визначено послідовність виконання підсилення балок з клеєної деревини композитними стрічками *Sika CarboDur S512*. Встановлено, що підсилення експериментального зразка шляхом наклеювання на розтягнуту зону композитних стрічок, зменшує вертикальні деформації на величину до 13%, в той же час, руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками відбулось при значенні, яке є на 63% більшим за граничне максимальне розрахункове навантаження при $k_{mod}=1$ та на 80% більшим за максимальне розрахункове навантаження експериментального зразка не підсиленого композитними стрічками з урахуванням коефіцієнту k_{mod} розрахованим відповідно до ДБН В.2.6-161:2017. За якісним характером напруженого стану деревини отриманого експериментальним дослідженням в балках з клеєної деревини та в балках з клеєної деревини підсилених композитними стрічками чітко видно, що максимальні повздовжні напруження в підсилених балках зменшились до 42%, максимальні дотичні напруження

збільшилися в підсилених балках до 57%, а дотичні напруження збільшилися в деяких перерізах до 79%.

У четвертому розділі проведено аналіз чисельного моделювання експериментальної установки, з метою визначення напружень в перерізах, визначенні вертикальних деформацій та порівняння отриманих результатів, з натурними експериментальними випробуваннями. Визначено, що результати моделювання експериментального зразка в середовищі ПК ЛІРА-САПР, де вертикальні деформації в зразках підсилених композитними стрічками зменшилися на величину до 17%, підтверджують результати підсилення експериментального зразка шляхом наклеювання на розтягнуту зону композитних стрічок, в яких вертикальні деформації зменшуються на величину до 13%. Встановлено, що якісний характер напруженого стану деревини отриманий з числового дослідження підтверджується експериментом, загалом поздовжні напруження в розтягнутій зоні досліджуваних перерізів мають добру збіжність. Деякі відмінності в кількісних значеннях поперечних та дотичних напружень пояснюються особливостями будови деревини та наявністю факторів, які можуть суттєво впливати на її напружено-деформований стан і як наслідок міцність в цілому. Електротензометрія дуже чутлива до неоднорідної будови деревини. В програмному комплексі деревина задається ідеалізованою. Встановлено, що руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками, відбулось в зоні концентрації нормальних вздовж волокон, поперек волокон та дотичних напружень, що доводить необхідність проведення додаткових розрахунків за умовами міцності при складному напруженому стані.

Проведені дослідження дозволили розробити інженерну методику розрахунку елементів з клесної деревини, підсилених (армованих) композитними стрічками, яка полягає у застосуванні до загальних формул, для розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності, які містяться в ДБН В.2.6-161:2017 приведених характеристик до зовнішніх дошок елементів, та перевірок зон концентрації комбінації

нормальних вздовж волокон, поперек волокон та дотичних напружень за умовами міцності при складному напруженому стані (СНС).

Ключові слова: конструкції, деревина, клеєна деревина, перехресно-клеєна деревина, підсилення, композитні стрічки, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, напружено-деформований стан, вертикальні деформації, напруження, армування, відносні деформації, складний напружено-деформований стан.

ABSTRACT

Komar M. A. Structures Made of Glued and Cross-Laminated Timber Reinforced with Composite Strips. – Qualification scientific work in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 – Construction and Civil Engineering, field of knowledge 19 – Architecture and Construction. – Kyiv National University of Construction and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The Main Content of the Dissertation

The dissertation aims to increase the load-bearing capacity of glued laminated timber (glulam) and cross-laminated timber (CLT) structures while reducing their cross-sectional dimensions. This is intended to expand the application scope of such structures and promote the implementation of environmentally friendly urban spaces.

Based on the reviews, analyses, finite element, and experimental studies conducted::

- An analysis of existing calculation methods for glulam and CLT elements reinforced with composite materials was performed;
- The actual stress-strain state of glulam and CLT structures reinforced with composite tapes was investigated using computer modeling with the finite element method in a software package;
- An experimental study of the stress-strain state of glulam beams reinforced with composite tapes was conducted;
- The calculation method for glulam and CLT elements reinforced with composite tapes was improved;
- Recommendations regarding the production algorithms of glulam and CLT structures with composite tapes were provided;

From the perspective of the philosophy of science, the modern world is experiencing increasing scientific and technological progress. Humanity is creating complex systems to meet its needs, such as providing a comfortable living environment

and various types of activities. However, as the complexity of these systems increases, so does their vulnerability to unpredictable threats of various natures. Scientific research in the field of building design should aim at enhancing human safety, structural safety, environmental sustainability, and energy efficiency.

In the *section 1*, an analysis of the current state of research on reinforced wooden structures is conducted, highlighting the necessity for a detailed study of such structures reinforced with composite tapes. Currently, in Ukraine, there is an almost complete lack of research on the combined performance of composite tapes with wooden structures and their mutual influence, which prevents the development of an engineering calculation methodology. However, such research is actively being conducted worldwide, proving its relevance. Practical recommendations for designing wooden structures with composite tape reinforcement are currently lacking in Ukraine, making their development extremely necessary and leading to increased application of such structures in various types of buildings and constructions.

In the *section 2*, an analysis of numerous numerical studies on the stress-strain state of glued laminated timber (glulam) and cross-laminated timber (CLT) structures reinforced with composite tapes using the finite element method (FEM) in the LIRA-SAPR software package is conducted. It has been proven that glulam beams reinforced with composite tapes have, on average, 18% less vertical deformation and 27% lower normal stresses compared to similar glulam beams not reinforced with composite tapes. Glulam frames reinforced with composite tapes have, on average, 39% less vertical deformation and 57% lower maximum normal stresses in the tensioned zone of the beams. CLT plates reinforced with composite tapes have, on average, 20% less vertical deformation and 32% lower normal stresses compared to similar CLT plates not reinforced with composite tapes. However, selecting a universal method for numerical modeling of glulam and CLT structures in software packages requires further study.

In the *section 3*, in the third chapter, experimental studies of a full-size sample of a glulam beam reinforced with composite tapes are described. Based on the analysis of the stress-strain state of the glulam beam reinforced with composite tapes from the

experiment, it was found that determining the mechanical properties of wood in bending, by testing samples of wood from the same batch, provides reliable modulus of elasticity values for use in the calculation of real structures. An algorithm for conducting experimental studies of glulam beams reinforced with composite tapes using strain gauge techniques is provided. The sequence for reinforcing glulam beams with Sika CarboDur S512 composite tapes is specified. It was found that reinforcing the experimental sample by bonding composite tapes to the tension zone reduces vertical deformations by up to 13%. At the same time, the failure of the reinforced experimental sample occurred at a value 63% higher than the ultimate design load with $k_{mod} = 1$ and 80% higher than the ultimate design load of the unreinforced experimental sample, considering the k_{mod} factor calculated according to DBN V.2.6-161:2017. The qualitative nature of the stress state of wood obtained from experimental research in glulam beams and glulam beams reinforced with composite tapes clearly shows that the maximum longitudinal stresses in the reinforced beams decreased by up to 42%, the maximum shear stresses increased by up to 57% in the reinforced beams, and the shear stresses increased in some sections by up to 79%.

In the *section 4*, an analysis of the numerical modeling of the experimental setup is conducted to determine stresses in the sections, assess vertical deformations, and compare the obtained results with actual experimental tests. It was found that the modeling results of the experimental sample in the LIRA-SAPR software environment, where vertical deformations in samples reinforced with composite tapes decreased by up to 17%, confirm the results of reinforcing the experimental sample by bonding composite tapes to the tension zone, where vertical deformations decrease by up to 13%. The qualitative nature of the stress state of wood obtained from numerical research is confirmed by the experiment. Overall, the longitudinal stresses in the tension zone of the examined sections show good correlation. Some differences in the quantitative values of transverse and shear stresses are explained by the peculiarities of the wood structure and the presence of factors that can significantly influence its stress-strain state and, consequently, its overall strength. Strain gauge measurements are very sensitive to the heterogeneous structure of the wood, whereas in the software

environment, the wood is idealized. It was determined that the failure of the experimental sample reinforced with composite tapes occurred in the zone of concentration of normal stresses along the fibers, across the fibers, and shear stresses. This finding underscores the necessity for additional calculations regarding strength conditions under complex stress states.

The conducted research has enabled the development of an engineering methodology for calculating elements of glued laminated timber reinforced with composite strips. This methodology involves the application of general formulas for assessing elements of wooden structures based on the ultimate limit states contained in DBN V.2.6-161:2017. It includes the characteristics of elements up to the external boards and checks stress concentration zones of combinations of normal stresses along fibers, across fibers, and shear stresses under conditions of strength in complex stress states (CSS).

Keywords: structures, timber, glued laminated timber, cross-laminated timber, reinforcement, composite strips, finite element method, numerical modeling, stress-strain state, vertical deformations, stresses, strengthening, strain ratios, complex stress-strain state.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «А», яке цитується у реферативній базі Web of Science

1. Komar M.A., Mykhailovskyi D.V. & Komar O.A. (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. – P. 239-262. doi: [10.32347/2410-2547.2022.109.239-262](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.239-262). *Особисто автором змодельовано та проаналізовано напружено-деформований стан балок з клеєної деревини без підсилення та підсиленних композитними стрічками, проведені розрахунки за існуючими аналітичними методиками, та виконано порівняння існуючих аналітичних методик розрахунку з запропонованою та з чисельною методикою моделювання в програмному комплексі ЛІРА-САПР методом скінченних елементів (Web of Science).*
2. Komar M.A. & Mykhailovskyi D.V. (2024). Definition of the stress-strain state of a glued laminated timber beam reinforced with composite strips using experimental method. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. - К.: KNUBA. - Issue 112. - P. 43-51. doi: [10.32347/2410-2547.2024.112.43-51](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.43-51). *Особисто автором запропоновано методику визначення напружено-деформованого стану балки з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками експериментальним методом, встановлено фактичний напружено-деформований стан та фактичну несучу здатність такої балки, надано рекомендації щодо аналізу напружено-деформованого стану таких конструкцій в майбутньому. (Web of Science).*

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»

3. Комар М., & Михайловський Д. (2020). Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини армованої композитною арматурою. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (7), 93–100. doi: [10.32347/2522-4182.7.2020.93-100](https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.93-100). Особисто здобувачем розроблено графічну та ілюстративну частину.
4. Комар М., & Михайловський Д. (2021). Армування конструкцій з деревини композитними матеріалами, стан і перспективи. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (9), 72–80. doi: [10.32347/2522-4182.9.2021.72-80](https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80). Особисто автором проведено аналіз досліджень конструкцій з деревини армованих композитними матеріалами.
5. Komar M., & Mykhaylovskiy D. (2022). Analysis of the stress-strain state of laminated timber beams reinforced with composite tapes. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 90-97. doi: [10.26906/znp.2021.57.2590](https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2590). Особисто автором змодельовано та проаналізовано напружено-деформований стан балок з клеєної деревини без підсилення та підсиленних композитними стрічками в програмному комплексі ЛІРА-САПР методом скінченних елементів.
6. Комар М., & Михайловський Д. (2022). Аналіз досліджень застосування композитних стрічок для підсилення дерев'яних конструкцій. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (10), 4–10. doi: [10.32347/2522-4182.10.2022.4-10](https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.4-10). Особисто автором проведено аналіз досліджень застосування композитних стрічок для підсилення дерев'яних конструкцій.
7. Комар М., & Михайловський Д. (2022). Аналіз напружено-деформованого стану рам з клеєної деревини підсиленних композитними стрічками. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (11), 53–60. doi: [10.32347/2522-4182.11.2022.53-60](https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.53-60). Особисто автором змодельовано та проаналізовано напружено-деформований стан рам з клеєної деревини без підсилення та підсиленних

композитними стрічками в програмному комплексі ЛІРА-САПР методом скінченних елементів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Комар М. А., Михайловський Д. В. Панелі з поперечно-клеєної деревини армовані композитною арматурою // BUILD-MASTER-CLASS-2020: conference proceedings international scientific – practical conference of young scientists (Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів) (Київ, 25-27.11.2020). Р.140-141.

9. Комар М. А., Михайловський Д. В. Панель з поперечно-клеєної деревини армована композитними стрічками / III науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (Робоча програма та тези доповідей) // ((Київ, 22-23.04.2021 р.) – 156 с. С.45-46.

10. Комар М. А., Михайловський Д. В. Тришарнірні рами з клеєної деревини підсилені композитними стрічками // BUILD-MASTER-CLASS-2022: conference proceedings international scientific – practical conference of young scientists (Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів) (Київ, 30.11-02.12.2022). Р.159-160.

11. Комар М. А., Михайловський Д. В., Комар А. А., Комар О. А., Плити з поперечно-клеєної деревини армовані композитними стрічками // BUILD-MASTER-CLASS-2023: conference proceedings international scientific – practical conference of young scientists (Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів) (Київ, 29.11-01.12.2023). Р.187-188.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

12. Комар М. А., Михайловський Д. В., Комар А. А. Патент на корисну модель № 147059 Україна, МПК E04C 3/02 (2006.01), E04C 3/12 (2006.01), E04C 3/14 (2006.01). Панель з поперечно-клеєної деревини, армована композитною арматурою / заявники і власники: Київський національний університет

будівництва і архітектури, Комар М. А., Михайловський Д. В., Комар А. А.; – № u2020 07239; заяв. 12.11.2020; опубл. 07.04.2021, Бюл. № 14.

13. Комар М. А., Михайловський Д. В., Комар А. А. Патент на корисну модель № 147060 Україна, E04C 3/12 (2006.01). Панель з поперечно-клеєної деревини, армована композитними стрічками / заявники і власники: Київський національний університет будівництва і архітектури, Михайловський Д. В., Комар М. А., Комар А. А.; – № u2020 07240; заяв. 12.11.2020; опубл. 07.04.2021, Бюл. № 14.

14. Комар М. А., Михайловський Д. В., Комар А. А. Патент на корисну модель № 147061 Україна, МПК E04C 3/06 (2006.01), E04C 3/12 (2006.01). Комбінована плита з поперечно-клеєної деревини та залізобетону / заявники і власники: Київський національний університет будівництва і архітектури, Комар М. А., Михайловський Д. В., Комар А. А.; – № u2020 07241; заяв. 12.11.2020; опубл. 07.04.2021, Бюл. № 14.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ АРМОВАНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	25
1.1. Світовий досвід застосування армованих дерев'яних конструкцій.....	25
1.2. Застосування композитних стрічок при підсиленні будівельних конструкцій.....	34
1.3. Аналіз досліджень застосування композитних стрічок з дерев'яними конструкціями.	46
1.4. Висновки по розділу 1.....	48
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЧИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ З КЛЕЄНОЇ ТА ПЕРЕХРЕСНО- КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ.....	49
2.1. Аналіз напружено-деформованого стану балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками	49
2.2. Аналіз напружено-деформованого стану тришарнірних рам з клеєної деревини підсилених композитними стрічками.	68
2.3. Аналіз напружено-деформованого стану плит з перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками.	86
2.4. Висновки по розділу 2.....	106
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКИ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНОЇ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ.....	108
3.1. Визначення механічних властивостей деревини яка використовувалась при виготовленні експериментальних клеєних балок.....	110
3.2. Експериментальні випробування моделі балки з клеєної деревини.	117
3.3. Результати експериментальних випробувань моделі балки з клеєної деревини.....	127
3.4. Висновки по розділу 3.....	134
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ.....	135
4.1. Чисельні дослідження експериментальної моделі балки з клеєної деревини.....	135

4.2. Аналіз результатів чисельних та експериментальних досліджень	146
4.3. Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини підсилених композитними стрічками	154
4.4. Висновки по розділу 4.....	162
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
ДОДАТКИ.....	179

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

КД – клеєна деревина;

ККД – конструкції з клеєної деревини;

ПКД – перехресно-клеєна деревина;

CLT – cross laminated timber;

АКД – армовані конструкції з деревини;

ПК – програмний комплекс;

СЕ – скінченний елемент;

МСЕ – метод скінченних елементів;

СНС – складний напружений стан

ВСТУП

Актуальність теми дослідження: На сьогодні в будівельній галузі все більше з'являється потреба впровадження екологічного міського простору та використання матеріалів з відновлювального природного ресурсу, одним з таких будівельних матеріалів з стародавніх часів була деревина. В усьому світі з стародавніх часів за допомогою дерев'яних конструкцій зводилися храми, замки, будинки, мости та інші споруди. Велика кількість будівель і споруд з деревини успішно функціонують вже 300 - 400 років і служать яскравими прикладами довговічності цих конструкцій. В наші дні дерев'яне будівництво стрімко розвивається з розвитком нових технологій, цьому присвячено роботи [1 – 3]. Світовий досвід експлуатації дерев'яних конструкцій різноманітного призначення підтверджує доцільність їх використання. Адже новинки технологій деревообробки дозволяють отримати зрощений масив дерева, що вирішує багато різноманітних питань деревини як конструкційного матеріалу. Останнім часом, особливо розповсюдження, набули конструкції з клеєної деревини (ККД), конструкції з якою часто застосовують для перекриття великих прольотів (більш ніж 100 м) та конструкції з перехресно-клеєної деревина (ПКД) або CLT (cross laminated timber), які складаються з непарної кількості шарів дошок зі взаємно перпендикулярним їх розташуванням у суміжних шарах. З ПКД виготовляються панелі які використовуються в панельному та панельно-каркасному будівництві споруд різної складності архітектурної форми та поверховості, що висвітлено в роботі [2]. В роботах [4 – 11] більш докладно викладені дослідження ККД та ПКД та методики їх розрахунку. Проте, деякі будівельні вимоги, наприклад умови обмеження будівельної висоти, коли застосування порівняно великих перерізів конструкцій з клеєної деревини, розрахованих з додержанням вимог граничних станів, є неможливим. Тому все більшої актуальності набуває пошук і дослідження модифікованих ККД, в тому числі армованих, для збільшення несучої здатності при зменшенні їхнього поперечного перерізу.

Дослідженнями армування конструкцій з клеєної деревини, інших конструкцій підсилених новітніми композитними матеріалами та невеликий досвід підсилення композитними матеріалами конструкцій з клеєної деревини присвячені роботи Зятюка, Панченка, Рудневої, Башинського, Гомона, Були, та інших [12 – 17].

В вітчизняних нормах [18 – 19] відсутні розрахунки та вказівки по використанню, будь яких конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини армованих композитними матеріалами, тому це питання вимагає додаткових досліджень і вивчення та якнайшвидшого впровадження. Слід зазначити, що в нормативних документах Sika [20 – 23], різних країн є технічні рекомендації, по їхньому використанню тільки для залізобетонних конструкцій, хоча і прописана можливість застосування цих матеріалів і для конструкцій з деревини. Питання розробки інженерної методики розрахунку та практичних рекомендацій по використанню композитних матеріалів з КД та ПКД є досить актуальним і сприятиме підвищенню їх надійності та розширить діапазон їх використання при зведенні будівель і споруд різноманітного призначення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тема дисертації і отримані результати відповідають актуальному напрямку науково-технічної політики України відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 23.05.2011 р. №547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу». Дослідження виконані в межах кафедральної науково-дослідної роботи „Вдосконалення металевих та дерев'яних будівельних конструкцій”. У даній темі автором була розроблена методика розрахунку елементів ККД та ПКД підсилених композитними стрічками. Удосконалено методику розрахунку ККД та ПКД підсилених композитними стрічками та представлено алгоритм розрахунку за допомогою методу скінчених елементів в сучасних розрахункових програмних комплексах.

Мета роботи полягає у дослідженні, узагальненні і уточненні закономірностей напружено-деформованого стану елементів ККД та ПКД підсилених композитними стрічками та в удосконаленні методики розрахунку ККД та ПКД підсилених композитними стрічками за допомогою інженерної методики розрахунку.

Об'єкт дослідження: Конструкції з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками.

Предмет дослідження: Напружено–деформований стан конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками.

Методи дослідження являють собою сукупність методів бібліографічного пошуку, теоретично–аналітичних методів будівельної механіки, аналізу даних отриманих при натурних випробуваннях та чисельних дослідженнях з використанням сучасних обчислювальних програмних комплексів.

Основні задачі дослідження:

- Провести аналіз існуючих методик розрахунку елементів конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними матеріалами;
- Дослідити дійсний напружено–деформований стан конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками за допомогою комп'ютерного моделювання з застосуванням методу скінчених елементів в програмному комплексі;
- Проведення експериментального дослідження напружено-деформованого стану балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками;
- Удосконалення методики розрахунку елементів з клеєної деревини та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками;
- Надати рекомендації, щодо алгоритмів виробництва конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини композитними стрічками;

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- одержані узагальнені аналітичні положення та рекомендації і методика розрахунку елементів конструкцій з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками;
- проведено аналіз та виявлено нові закономірності зміни напружено-деформованого стану великопрольотних конструкцій з клеєної деревини підсилених композитними стрічками;

Вдосконалено:

- послідовність виконання підсилення конструкцій з застосування композитних стрічок на основі вуглецевих волокон;
- методику створення розрахункових моделей методом скінчених елементів в програмному комплексі ЛІРА-САПР конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками.

Теоретичне та практичне значення результатів.

Дисертація містить наукові положення, нові науково обґрунтовані теоретичні результати проведених досліджень, які мають істотне значення для галузі знань 19 – Архітектура та будівництво.

Теоретичне значення дисертаційного дослідження полягає в узагальненні та в розробці методики розрахунку ККД підсилених композитними стрічками з урахуванням дійсного напружено-деформованого стану.

Практичне значення дисертаційного дослідження полягає в тому, що розроблено інженерну методику розрахунку елементів конструкцій з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками, розроблено методику створення розрахункової моделі конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками в ПК ЛІРА-САПР, розроблено послідовність проведення підсилення конструкцій з клеєної деревини композитними стрічками.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 6 наукових праць, у тому числі: 5 статей у наукових фахових виданнях України категорії «Б»; 2 – у наукових фахових виданнях України категорії «А», яке цитується у реферативній базі *Web of Science*; 4 тез наукових доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій; отримано 3 патенти на корисну модель за темою дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. Основні результати та розробки, які відображають суть дисертації, виконані здобувачем самостійно. Вибір теми та формування основних завдань дослідження виконані спільно з науковим керівником. Особистий внесок здобувача полягає у формуванні задач дослідження, генерування ідей щодо їх виконання, проведення чисельних розрахунків, аналіз їх результатів. Робота містить теоретичні та практичні положення та висновки, сукупність яких кваліфікується як вагомий внесок у розвиток будівництва. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором особисто. В 6 роботах підготовлених у співавторстві викладені наступні наукові результати, що належать автору: розроблено інженерну методику розрахунку елементів з клеєної деревини, армованої композитною арматурою; проведено аналіз досліджень застосування композитних стрічок для підсилення дерев'яних конструкцій та аналіз та стану та перспектив армування конструкцій з деревини композитними матеріалами; також проведений аналіз напружено-деформованого стану балок та рам з клеєної деревини, підсилених композитними стрічками; розроблена інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини, армованих композитними стрічками. При цитуванні інших авторів здійснено посилання на відповідні джерела.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Київського Національного університету будівництва і архітектури, науковий керівник – Михайловський Денис Віталійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри металевих та дерев'яних конструкцій.

Дисертація характеризується єдністю змісту та відповідає вимогам щодо її оформлення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлені та обговоренні на наступних конференціях:

- International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2020» (Kyiv, 25-27.11.2020);
- III науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (Київ, 22-23.04.2021 р.)
- International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2022» (Kyiv, 30.11-02.12.2022);
- International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2023» (Kyiv, 29.11-01.12.2023);

За основними результатами та положеннями дисертаційної роботи отримано три патенти на корисну модель:

- патент на корисну модель № 147059 Україна, МПК E04C 3/02 (2006.01), E04C 3/12 (2006.01), E04C 3/14 (2006.01). Панель з поперечно-клеєної деревини, армована композитною арматурою;
- патент на корисну модель № 147060 Україна, E04C 3/12 (2006.01). Панель з поперечно-клеєної деревини, армована композитними стрічками;
- патент на корисну модель № 147061 Україна, МПК E04C 3/06 (2006.01), E04C 3/12 (2006.01). Комбінована плита з поперечно-клеєної деревини та залізобетону;

Публічна презентація наукових результатів дисертації, а також її обговорення відбувались на засіданнях кафедри металевих та дерев'яних конструкцій КНУБА (м. Київ, 2024 рік).

Результати досліджень впроваджено:

- під час проектування конструкцій поперечних рам прольотом 12 м пансіонату сімейного типу з об'єктами стаціонарної рекреації по вул. 11-та лінія, м. Ірпінь в Київській області;
- в навчальному процесі при викладанні курсів: «Конструкції з дерева і пластмас», «Спецкурс випускаючої кафедри – дерев'яні конструкції» при

підготовці освітніх рівнів бакалавра та магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі переліку прийнятих скорочень та позначень вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 188 сторінок, у тому числі основна частина складає 149 сторінки, список використаних джерел – 12 сторінок, додатки – 10 сторінок. Основна частина, крім тексту, включає таблиці, рисунки та формули.

Подяка. Висловлюю глибоку подяку науковому керівнику – доктору технічних наук, професору, професору кафедри металевих та дерев'яних конструкцій Михайловському Денису Віталійовичу. Також завдячую компанії ТОВ «СІКА УКРАЇНА» та особисто директору компанії Панченку Олександрю Валентиновичу за сприяння та наданні матеріалів компанії для проведення експериментального дослідження балок з клеєної деревини підсиленних композитними стрічками.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ АРМОВАНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Світовий досвід застосування армованих дерев'яних конструкцій.

Деревина, як матеріал має давню історію, а спектр її застосування з давніх часів, досить широкий. Від посуду та меблів, до житлових будинків, церков та інших споруд з деревини. В сучасному світі, окрім всього цього, деревину використовують, як конструкційний матеріал в різноманітних елементах. Незважаючи на те, що сама деревина має низку негативних властивостей таких, як: схильність до усушки і розбухання, піддатливість гниттю, неоднорідну волокнисту структуру, що безперечно потребує особливої уваги при будівництві для зменшення причин їхнього прояву, а в окремих випадках і обмеження застосування такої деревини в конструкціях [24]. З деревини виготовляють різного типу погонні деталі, паркет, столярні вироби деревоволокнисті плити та іншу продукцію, про які детально описано в роботах [25-41], а поява клеєної деревини для виготовлення будівельних конструкцій, що застосовуються при зведенні житлових будинків та промислових будівель, взагалі допомогла уникнути значної частини цих недоліків (наявність сучків, косошарості, впливу вологості, неоднорідності).

ККД мають підвищену несучу здатність, вогнестійкість та довговічність з порівняно малою власною вагою, завдяки чому їх можна використовувати для перекриття великих прольотів (до 100 м) без великих навантажень на опори. Крім того, технологія виготовлення ККД дозволяє отримувати криволінійні елементи різної форми, які використовуються, також, для створення різноманітних складних архітектурних форм [1 – 3]. Елементи та конструкції з цільної та клеєної деревини ефективні для зведення виробничих, сільськогосподарських споруд, мостів, стадіонів та споруд хімічної промисловості.

Проте є певні обмеження застосування ККД, як, наприклад, обмежена будівельна висота, за якої використання ККД з досить великою висотою поперечного перерізу унеможлиблюється. Тому актуальності набирають дослідження підсилених (армованих) конструкцій з клеєної деревини, для збільшення несучої здатності та жорсткості при зменшенні їхнього поперечного перерізу.

Одним з перших конструктивних рішень стало значне зменшення прямокутного поперечного перерізу дерев'яної балки, яке досягається за допомогою суцільної сталевий накладки, зігнутої в торцях балки та закріпленої нагелями (рис. 1.1.). Сталева накладка перед закріпленням до балки з деревини натягувалась, для досягнення ефекту попереднього натягу. Такі комбіновані балкові конструкції (конструкції системи Тірбаха) вперше з'явилися на початку ХХ століття і детально описані в роботі [42].

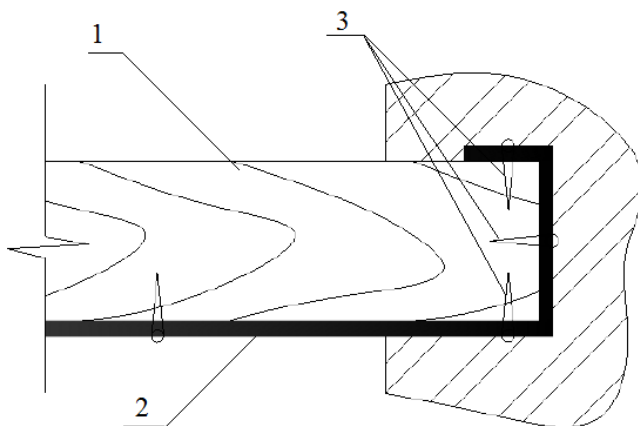


Рис. 1.1. Комбіновані балкові конструкції системи Тірбаха.

1 – дерев'яна балка; 2 – сталевий накладка; 3 – нагелі.

Подальший розвиток ідеї поєднання дерев'яних несучих елементів з металом запропонував використовувати в 1921 Л. Клайтила (США) в конструкціях дирижаблів та аеропланів несучі елементи коробчастого перерізу із запресованим в поличках сталевим дротом. З плином часу розглядались ще варіанти поєднання деревини з металом такі, як: вкладання сталевих прутків в заздалегідь виконані пази квадратного дерев'яного перерізу заливаючи їх спеціальною мастикою, використання сталевий полоси з заздалегідь виконаними в ній зубцями для з'єднання з деревиною та використання арматурних стержнів

які мали на собі кільцеві виступи з певним кроком для вдавнення в стінки спеціально виготовлених пазів для цих виступів запропоновані Фішером [43], Мончевичом А.Д. [44] та Х. Гранхольмом [43] відповідно.

Намагання поєднати метал з деревиною наштовхнуло на необхідність створення синтетичних клеїв, які повинні були спростити з'єднання матеріалів різних за своєю структурою з деревиною, що дало б змогу створення ефективних армованих дерев'яних конструкцій.

Так з кінця минулого сторіччя почалось вивчення армованих конструкцій з деревини (АКД). Так, параграф 52 підручника В.А. Іванова [4] «Армовані дощатоклеєні балки» присвячений тому, що армування збільшує несучу здатність, жорсткість та надійність дерев'яних балок. Найбільш ефективним є армування розтягнутої та стиснутої зон. При коефіцієнті армування 1-3% міцність та жорсткість збільшуються в 1,4-3,2 рази. В [4] рекомендується використання стержневої гарячекатаної арматури періодичного профілю зі сталі класу А-II, А-III, А-IV (А300С, А400С-А500С, А600С відповідно). Арматура вкладається в пази, в які далі заливається епоксидний клей з наповнювачем та виконується запресування пакету. Також запропоновано виконувати розрахунок армованих балок на міцність за нормальними та дотичними напруженнями за формулами:

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{пр}}} \leq R; \quad \tau = \frac{Q_{\text{max}} \cdot S_{\text{пр}}}{b_{\text{розр}} \cdot I_{\text{пр}}} \leq R_{\text{ск}}, \quad (1.1)$$

та зазначені формули для визначення геометричних характеристик поперечного перерізу для балок з подвійним армуванням:

$$I_{\text{пр}} = \frac{b \cdot h^3}{12} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu \right); \quad (1.2)$$

$$W_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot I_{\text{пр}}}{h}; \quad (1.3)$$

$$S_{\text{пр}} = \frac{b \cdot h^2}{8} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu \right); \quad (1.4)$$

де $\mu = \frac{F_a}{b \cdot h}$ - коефіцієнт армування поперечного перерізу, F_a – площа арматури,

b і h - розміри поперечного перерізу. Крім цього, міститься рекомендація виконувати перевірки за другою групою граничних станів з урахування $I_{пр}$.

У посібнику [28] в п. 5.3. «Клеєні балки армовані сталевими стержнями» дається рекомендація, що армовані балки з клеєної деревини використовуються в випадках, коли необхідно збільшити несучу здатність або зменшити деформативність балок в умовах обмеженої будівельної висоти, або зменшити витрати деревини. Вказано, що ефективні такі балки при великих прольотах при дії значних навантажень. Як і в [4] запропоновано використовувати стержневу гарячекатану арматуру періодичного профілю зі сталі класу А-II, А-III, А-IV (А300С, А400С-А500С, А600С відповідно) в межах 1-3% площі поперечного перерізу балки, а також використання стержнів або стрічок односпрямованих склопластиків (1-5%). Армувати такі балки пропонується в розтягнутій та стиснутій зонах (симетричне армування) (Рис. 1.2, а), або тільки в розтягнутій зоні (одинарне армування) (Рис.1.2, б).

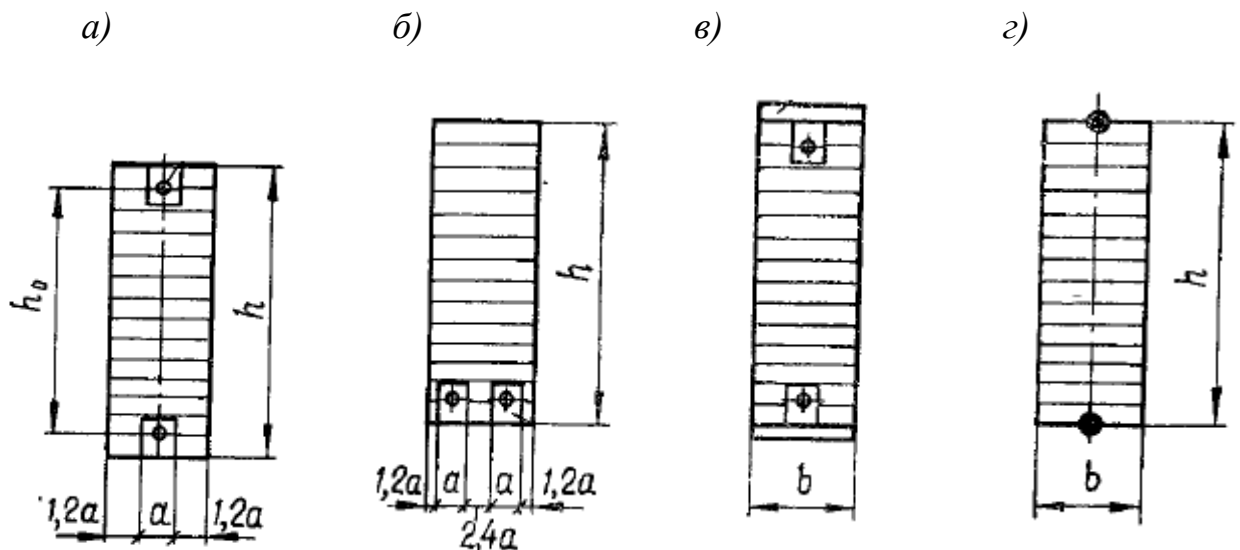


Рис. 1.2. Армування балок з клеєної деревини: а – переріз симетричного армування; б – переріз несиметричного армування; в – балка з захисними накладками; г – розміщення арматури для розрахунку балок.

В [45] рекомендується для укладання арматури в балках фрезерувати пази з розмірами на 5 мм більше розміру арматури, в які потім заливати епоксидний

клей з наповнювачем, і вкладати арматуру. Відстань між пазами (Рис.1, б), приймати не менше 20 мм та менше 2,4 ширини пазу. Рекомендовано при експлуатації в агресивних середовищах арматуру захищати шляхом наклейки на торці балок дошок або фанери (Рис.1.2, в). Вказано, що розрахунок армування балок слід виконувати за приведеними до деревини модулем пружності. Для спрощення розрахункових формул прийнято передумову, що вісь або вісі арматурних стержнів знаходиться на крайніх гранях балки (Рис.1, з). Наведено алгоритм конструктивного розрахунку армованих балок з деревини. Для балок з симетричним армуванням геометричні характеристики приведені до деревини визначаються, як і в [4], а для балок з одинарним армуванням:

$$I_{\text{пр}} = \frac{b \cdot h^3 \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu\right)}{12 \cdot \left(1 + \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu\right)}; \quad (1.5)$$

$$W_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot I_{\text{пр}}}{y}; \quad (1.6)$$

$$S_{\text{пр}} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu\right)}{8 \cdot \left(1 + \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu\right)}; \quad (1.7)$$

Також рекомендовано перевіряти міцність клеєного шва, з'єднуючого арматуру з деревиною за формулою:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_{\text{а,пр}}}{I_{\text{пр}} \cdot \sum h_{\text{ш}}} \leq R_{\text{ск}}, \quad (1.8)$$

де $S_{\text{а,пр}} = \frac{E_a/E_d \cdot h \cdot F_a}{4}$ - при симетричному армуванні, та $S_{\text{а,пр}} = E_a/E_d \cdot h_p \cdot F_a$ - при несиметричному армуванні (тут $h_p = h/2 \cdot \left(1 + \frac{E_a}{E_d} \cdot \mu\right)$); $\sum h_{\text{ш}}$ - поверхня зсуву арматури, рівна половині периметру шва, який з'єднує арматуру з деревиною.

Дослідження в області армованих конструкцій з клеєної деревини проводяться в Фінляндії, Швеції, Германії, США. Основними перевагами армованих балок є збільшена міцність та жорсткість балок, зменшення висоти поперечного перерізу конструкцій та економія якісної деревини до 15%. До недоліків таких конструкцій відноситься збільшення трудомісткості та вартості виготовлення. На рис.1.3., наведені основні схеми армування балок та їх поперечних перерізів. Зазначено, що технологія виготовлення армованих конструкцій з клеєної деревини (АККД) відрізняється від технології звичайних ККД появою додаткової операції вклеювання арматурних стержнів та висвітлено її алгоритм. Зазначені основні правила конструювання армованих балок та визначенні особливості їхнього розрахунку.

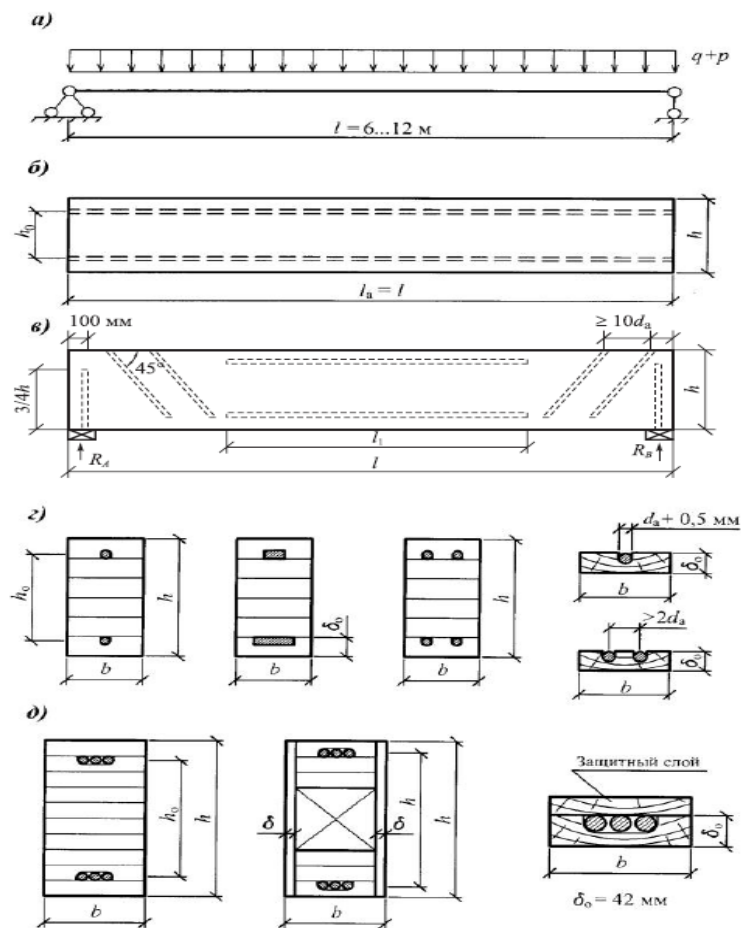


Рис.1.3. Армування балки з клеєної деревини: *а* – схема прикладання навантажень; *б* – схема армування балки одиночними стрижнями; *в* – схема армування балки; *г* – типи поперечних перерізів з одиночним армуванням; *д* – типи поперечних перерізів з груповим армуванням.

В статті [15], згодуються автори які розглянули основні проблеми армованих сталевими стержнями ККД в будівництві. В посібнику авторів викладено матеріали, щодо армування дерев'яних конструкцій, застосування їх в будівництві та якими основними матеріалами вони армуються. Розкрито основні методи проектування армованих конструкцій з деревини (АКД). Розглянуто особливості розрахунку за двома групами граничних станів, особливості проектування балок з груповим армуванням. Задано алгоритми розрахунків армованих конструкцій з деревини при поперечному згині та АКД, що працюють на стиск зі згином. Наведені приклади розрахунку балок з подвійним симетричним армуванням, балок з груповим армуванням, балок з перемінною жорсткістю, двоскатних армованих балок та верхнього поясу трикутних арок. Розроблена номенклатура клеєних армованих конструкцій для виробничих та складських приміщень. Надано опис та характеристику клеєним армованим дерев'яним балкам, аркам, рамам, колонам та стійкам. Вказані особливості технології виготовлення АКД, та склеювання арматури з деревиною в конструкції.

В дисертації Сурмай М.І., [42] досліджено сумісну роботу деревини з композитною арматурою на епоксидному клею. Наведено формули для визначення довжини анкерування арматури в балках з клеєної деревини та уточнено інженерну методику розрахунку таких балок. Автор висвітлив експериментальні та чисельні дослідження напружено-деформованого стану армованих балок з клеєної деревини при роботі на згин та вивів коефіцієнт зменшення прогину для розрахунку балок у ПК «ЛИРА». Надав рекомендації для проектування та виготовлення АККД.

В роботі [46] запропоновано інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини армованої композитною арматурою. В роботі представлено методику яка полягає в застосуванні до стандартних формул розрахунку приведених характеристик поперечного перерізу: приведена площа поперечного перерізу до дошок зовнішнього шару

$$A_{x,ef} = \sum A_{x,i} \frac{E_{x,i}}{E_x}, \quad (1.9)$$

де: $A_{x,i}$ – площа перерізу i -го шару дошок та армування (переріз перпендикулярний осі x - вздовж волокон деревини дошок зовнішнього шару); E_x – модуль пружності дошок відносно осі x , вздовж волокон зовнішнього шару; $E_{x,i}$ – модуль пружності i -го шару дошок відносно осі x та модуль пружності армування,

приведений момент опору до дошок зовнішній шарів

$$W_{x,ef} = \frac{I_{x,ef}}{h_s}, \quad (1.10)$$

в якій: $I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x , h_z – відстань від центру ваги поперечного перерізу до крайнього волокна в якому визначається напруження,

приведений момент інерції перерізу до дошок зовнішніх шарів

$$I_{x,ef} = \sum I_{x,ef,i} \frac{E_{x,i}}{E_x} + \sum a_i^2 A_i \frac{E_{x,i}}{E_x}, \quad (1.11)$$

де: $I_{x,ef,i}$ – момент інерції перерізу перпендикулярного осі x i -го шару дошок та арматури; $A_{x,i}$ – площа перерізу i -го шару дошок та арматури перпендикулярного осі x ; a_i – відстань від нейтральної осі перерізу панелі до осі центру перерізу i -го шару дошок та арматури; E_x – модуль пружності дошок вздовж волокон; $E_{x,i}$ – модуль пружності i -го шару дошок та арматури відносно осі x .

Запропоновано для розрахунку балок з клеєної деревини армованих композитною арматурою за експлуатаційною придатністю (другим граничним станом) використовувати, також, приведений модуль пружності перерізу дошок зовнішніх шарів, в яких і будуть спостерігатись максимальні нормальні напруження

$$E_{ef} = \frac{I_{x,ef} E_x}{I_{x,bx}}, \quad (1.12)$$

в якій: має виконуватись умова $I_{x,ef} E_x = I_{x,br} E_{ef}$,

де: $I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x ; E_x – модуль пружності дошок зовнішніх шарів вздовж волокон; $I_{x,br}$ – момент інерції перерізу без врахування наявності армування; E_{ef} – приведений модуль пружності елемента з клеєної деревини армованого композитною арматурою вздовж волокон.

Для аналізу даної методики було виконано порівняння чисельних досліджень балок одного класу міцності з клеєної деревини та з клеєної деревини армованих композитною арматурою з застосуванням аналітичних методик розрахунку та за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР методом скінченних елементів із використанням плоских скінченних елементів. В роботі доведено, що аналітичний розрахунок елементів прямокутного перерізу з клеєної деревини армованих композитною арматурою рекомендується проводити за запропонованою методикою, яка дозволяє врахувати товщину і механічні характеристики матеріалів з яких складається поперечний переріз елемента. Також встановлено, що моделювання таких конструкцій можливе стержневими елементами з наданням їм приведенного модуля пружності, що суттєво спрощує розрахунок складних стержневих систем.

Світовий та вітчизняний досвід використання АКД показує, що це є актуальний напрямок досліджень, який дозволяє збільшити несучу здатність конструкцій, зменшити власну вагу та величину поперечного перерізу використовуючи в ньому як сталеву так і композитну арматуру. На сьогоднішній час вже є певна кількість випадків практичного застосування таких конструкцій і експериментально-теоретичних досліджень щодо їхньої жорсткості та міцності. В той же час, відсутні експериментально-теоретичні дослідження щодо сумісної роботи та взаємодії з різними дерев'яними конструкціями інших композитних матеріалів таких, як композитні стрічки.

1.2. Застосування композитних стрічок при підсиленні будівельних конструкцій.

Розвиток сучасних композитних матеріалів, перш за все, був викликаним потребами кораблебудування, авіації, космонавтики де вони найшли широке застосування. Одним із перших сучасних композитних матеріалів був однонаправлений склопластик, що складався зі штучних неперервних скляних волокон та штучної полімерної матриці винайденої А. К. Буровим і його співробітниками, в 30-х роках. За часів Великої Вітчизняної війни пластини з склопластику використовували замість алюмінію в літакобудуванні. В 60-х роках минулого століття у Великобританії були розроблені вуглецеві волокна, а в Сполучених Штатах Америки – борні, що надало поштовх до розвитку нового покоління композитних матеріалів, які мали високий модуль пружності, високу міцність та жорсткість, що дозволило збільшити сферу їхнього застосування.

Зачасту сам композитний матеріал складається з двох компонентів – неперервна фаза (матриця) та наповнювач. Матриця може бути металева, керамічна, або полімерна. Наповнювач в вигляді волокон або частинок зазвичай виготовляють з міцних та жорстких матеріалів (вуглецю, скла, арамід, поліетилену, сталі, бору, карбід, кремнію тощо). Волокна в матриці можуть бути хаотично розташованими або мати певний напрямок орієнтації (рис.1.4.).

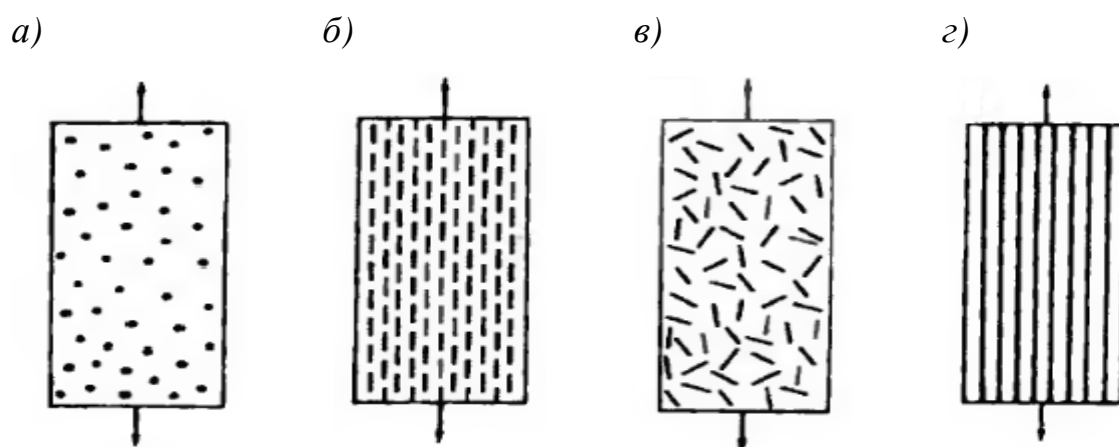


Рис.1.4. Приклади композитів: *a* – наповнений випадково розподіленими частинками; *б* – однонаправлені короткі волокна; *в* – випадково орієнтовані короткі волокна; *г* – однонаправлені неперервні волокна.

Композитні матеріали на основі фібри (волокон), які зараз використовують для ремонту та підсилення будівельних конструкцій, виготовляють з продовговуватих мікро волокон замонолічених в затверджуваному полімері, з'єднуючи їх в одне ціле. Вуглецеві арамідні та скловолокна є найбільш поширеними типами волокон. В якості затверджуваного полімера найчастіше використовують епоксидні та поліакрилонітрильні смоли. Саме в підсилені будівельних конструкцій використовують композитні матеріали з вуглецевими волокнами. Найбільш розповсюдженішими формами використання для підсилення композиційних матеріалів є полотна різного плетіння та смуги або пластини. Платна представляють собою гнучку тканину з одно або дво-спрямованим розташуванням волокон, які при встановленні на конструкцію занурюються в полімерний клей – матрицю, яка забезпечує щільне прилягання до конструкції. Смуги або пластини – це виготовлені в заводських умовах вироби з композиційних матеріалів, які приклеюються на завчасно підготовлену поверхню конструкції.

Фізико-механічні властивості композитних матеріалів визначаються типом та кількістю використаних волокон, їхнього розподілу та орієнтації в поперечному перерізі стрічки, а також об'ємним співвідношенням волокон та затверджуваного полімера в композиті. В таблицях 1.1 та 1.2 наведені типові механічні властивості композитних матеріалів та затверджуваних полімерів відповідно.

Табл. 1.1. Типові властивості волокон композитних матеріалів

Тип фібри	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа	Деформації зусиль, %	Щільність, т/м ³
Вуглець з високою міцністю*	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8
Вуглець з високим модулем пружності*	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Вуглець з високим модулем пружності**	2600 – 4020	540 – 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Арамід***	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Скло	2400 – 3500	70 – 85	3,5 – 4,7	2,6
*На поліакрилонітрильній матриці				
**На матриці з епоксидної смоли				
***Арамаїд може мати таку ж міцність з меншим модулем пружності				

Табл. 1.2. Властивості затверджуючих полімерів

Фізико механічні властивості полімерів	Фірма виробник				
	MBT	SBD	DML composites	Sika	Sumitomo
Міцність на розтяг, МПа	50	17	81	30	29
Міцність при згині, МПа	120	28	–	–	–
Модуль пружності при згині, ГПа	3	5	–	3,8	2,5
Температура скління, °С	55	60, 80	59	53	55

Композитні матеріали на основі вуглецевих, арамідних та скловолокон не мають пластичних зон деформування тому, через можливе їхнє крихке руйнування, розпочали проводити нові дослідження по створенню композитних матеріалів в яких в якості елемента армування виступає нове покоління сталевих волокон [47]. Такі сталеві волокна діаметром до 1 мм складаються із в'язаних сталевих пасм діаметром менше 1 мікрона, затверджуваний в епоксидному полімері. В англомовній літературі такий матеріал отримав назву SRP (Steel Reinforced Polymer), з якого виготовляють композитний матеріал в вигляді тканинних полотн товщиною до 5 мм. Лабораторні дослідження цих матеріалів показали, що вони мають міцність на розтяг до 750 МПа, тобто майже в шість раз менше ніж у матеріалів з основою із вуглецевих волокон, а модуль пружності співставний з сталлю. Проте вагомою перевагою таких матеріалів є пластичність, наявність плавної неспадаючої кривої на заграничній ділянці деформацій, та саме головне, при використанні їх з конструкціями із металу та залізобетону, їхні

близькі деформації зі сталлю та сталеву арматурою, що забезпечує майже повне використання міцнісних характеристик обох матеріалів.

Вибір типу композиційних матеріалів для підсилення визначається умовами експлуатації та призначення конструкцій що підсилюються. Тип волокон які будуть застосовуватись та їхнє розташування в матеріалі (одно або двох направлене) обумовлює міцнісні та деформаційні характеристики полотна композиційних матеріалів. При двох направленому розташуванні зазвичай 70% волокон знаходяться в напрямку в якому передбачається дія основного зовнішнього зусилля, та 30% – в поперечному напрямку. При цьому міцність такого матеріалу в основному напрямку значно знижується. Проте, окрім механічних параметрів композитних матеріалів, безпосередньо потрібних для розрахунку несучої здатності конструкцій, що підсилюються при проектуванні необхідно враховувати доволі багато інших фізичних параметрів, які в подальшому впливають на експлуатацію відремонтованої споруди: стійкість до хімічного впливу та ударного навантаження, довготривала міцність, вогнестійкість та електропровідність, відповідність санітарно-гігієнічних вимог та деякі інші. Коротко розглянемо деякі з них.

Деформативність при стиску. Випробування композитних матеріалів, які використовуються для відновлення та підсилення залізобетонних конструкцій, показали, що міцність на стиск менша ніж міцність на розтяг [48]. При повздовжньому стиску руйнування композитних матеріалів може відбуватись від деформацій поперечного розтягу, мікро згину волокон в поперечному напрямку або від зрізу. Вигляд руйнувань залежить від типу волокон та їхньої об'ємної кількості в композитному матеріалі та типу затвердженого полімеру. В середньому міцність на стиск складає від міцності на розтяг 78% для композитних матеріалів на основі вуглецю, 55% - на основі скловолокна та 20% для композитних матеріалів на основі арамідів. Через невелику кількість дослідів на цей час, застосовувати композитні матеріали в стиснутій зоні конструкцій не рекомендується, тому що відсутні гарантії надійності роботи такого підсилення залізобетонних елементів.

Супротив ударним навантаженням. Поведінка волокон під час прикладання ударних навантажень визначається отриманою ними енергією при пружному деформуванні. Волокна, що поєднують високу міцність на розтяг (більше 3500 МПа) та значне відносне подовження (більше 2%), є сприятливим матеріалом для сприйняття ударного навантаження. Таким вимогам відповідають багато типів вуглецевих, арамідних та скловолокон.

Вплив вогню. Скловолокно зберігає свою міцність аж до точки плавлення (більше 1000 °C), коли вуглецеві волокна окислюються на повітрі при температурі біля 275 °C. Арамідні волокна не можуть використовуватись при температурі вище 200 °C. При цьому через зменшення сил, що передаються між волокнами затвердзуючим полімером, погіршується робота на розтяг всього композиційного матеріалу. Експериментальні дослідження [49] свідчать, що при температурі приблизно 250 °C, що є багато вище температури скління полімеру, міцність на розтяг композитних матеріалів з вуглецевими та скловолокнами знижуються приблизно на 20%. Всі типи волокон підтримують горіння. В композиційних матеріалах при пожежі визначальною буде поведінка затверджуючого полімеру, при загоранні якого можуть виділятися токсичні речовини.

Стійкість до хімічного впливу. Вуглецеві та арамідні волокна добре опираються багатьом хімічним впливам: лугам, кислотам, хлоридам, сульфатам, нітратам та іншим. Багато типів скловолокна схильні до лужної корозії (при $pH > 11$), але мало піддаються впливу солей. Арамід в порівнянні з іншими волокнами володіє більшою водонепроникністю. Велика кількість солей може привести до зміни кристалічної решітки у всіх типах волокон.

Електропровідність. Арамідні та скловолокна є діелектриками та можуть бути використаними для захисту ліній електропередачі та інженерних комунікацій. Вуглецеві волокна проводять електричний струм, але вони також можуть бути використані для підсилення будівельних конструкцій, які мають не прямі відношення до дії електричного струму (наприклад, залізничні мости для електровозного транспорту). Вони повинні бути добре ізольовані від сталевих

арматури, яка є провідником електричного струму. Цей захист потрібен тільки для нанесення полотна на основі вуглецевих волокон «по місцю» від струмопровідних елементів.

Реологічні властивості. Всі композитні матеріали в тому або іншому ступені володіють повзучістю, тобто з часом їхня міцність на розтяг знижується. При цьому час ретардації залежить від несприятливих зовнішніх впливів – високої або низької температури, ультрафіолетового опромінення, лужного впливу, циклів «замерзання – відтаювання». Результати випробувань [50] показали, що лінійну величину довготривалої міцності від логарифму часу для будь якого рівня прикладеного навантаження. При довготривалих випробуваннях (більше 50 000 годин) коефіцієнти довготривалої міцності складають для композитних матеріалів на основі скловолокон – 0,3 для арамідних волокон – 0,47 та на вуглецевих волокнах – 0,91. Тобто вуглецеві волокна практично не схильні до повзучості. Довготривала міцність композиційних матеріалів при проектуванні враховується відповідним понижуючим коефіцієнтом.

Безпека та санітарія. Всі типи волокон не є небезпечними для здоров'я в умовах нормальної експлуатації. При безпосередньому виконанні робіт по підсиленню окремі частини фібри можуть привести до подразнення шкіри, очей та слизистих оболонок. Тому під час виконання робіт з ними необхідно користуватись індивідуальними засобами захисту. В деяких статтях [51] було висловлено припущення про канцерогенні властивості вуглецевих волокон. Проте Всесвітньою організацією охорони здоров'я вуглець не віднесений до канцерогенних матеріалів. Досліди що проводились на тваринах показали, що він є безпечним, а шкідливість дії вуглецевих волокон на людину на рівень нижчі ніж азбесту. Арамідні, вуглецеві та скловолоконні є інертними матеріалами які не містять токсичних речовин. Вони не містять шкідливих добавок, які здатні забруднювати повітря або потрапляти в ґрунт при їхньому використанні в підсиленні підземних споруд.

Система підсилення конструкцій композитними матеріалами складається з двох важливих складових – сам композитний матеріал та адгезив або клеючий склад. Успішне функціонування такої системи залежить, як від надійності роботи кожної із складових, так і від надійності їхньої спільної роботи. Основним призначенням клеючої складової окрім приклеювання є сприйняття зсувних та відривних зусиль між з'єднувальними поверхнями. Для приклеювання композитного матеріалу до бетонної поверхні найчастіше використовують епоксидні двокомпонентні клеючі склади, здатні схоплюватись при позитивній температурі навколишнього середовища. Найбільш поширені клеючі склади наведені в табл. 1.3.

Табл. 1.3. Клеючі склади, що використовуються світовими фірмами виробниками

Параметри	Постачальник та торговельна марка				
	<i>Exchem Resifix 31</i>	<i>MBT Mbrace adhesive</i>	<i>SBD Epoxy Plus</i>	<i>Sika Sikadur</i>	<i>Resiplast Epicol U</i>
Міцність на розтяг, Н/мм ²	24	30	19	30	50
Міцність на згин, Н/мм ²	55	100	35	–	–
Міцність на зсув, Н/мм ²	22	–	18	–	–
Модуль згину, кН/мм ²	6,5	3,5	9,8	12,8	–
Модуль зсуву, кН/мм ²	3,8	–	–	–	–
Температура скління, T_g , °C	60	56	60,8	–	60

Більшість адгезивів використовуються для з'єднання сухих поверхонь. Для склеювання вологих поверхонь та для з'єднання конструкцій що знаходяться в воді, розроблені спеціальні клеючі склади, як правило на епоксидній смолі.

Для досягнення якісного зчеплення композитного матеріалу з бетоном не менш важливим фактором повинні бути температурно-вологісні умови в місці проведення робіт та якість підготовки поверхні конструкції що підсилюється. Забруднена, а тим паче нерівна поверхня не може забезпечити необхідного за якістю зчеплення з композитним матеріалом.

В посібнику по підсиленню залізобетонних конструкцій композитними матеріалами, викладені основи проектування та технології зовнішнього армування залізобетонних конструкцій сучасними композитними матеріалами на основі вуглеводних, арамідних та скловолокон. Викладені основні положення по проектуванню підсилення залізобетонних конструкцій, що працюють на згин за першою та другою групами граничних стані. Приведена технологія підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами нового покоління. Розглянуті питання якості виконання робіт, вимоги до вихідних матеріалів та умови виконання робіт по підсиленню, а також вимоги по обов'язковому моніторингу підсиленої конструкції. Проаналізовано досвід роботи ЗАО «Триада-Холдинг» по підсиленню залізобетонних конструкцій композитними матеріалами.

У статті [12] наведено технологію підсилення залізобетонних балок наклеюванням композитів з вуглецевих волокон одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні з урахування повторних навантажень. Надані таблиці фізико-механічних характеристик композитних стрічок, композитного полотна, клеїв. Та заданий алгоритм технології виконання робіт, що включає в себе: підготовку поверхні бетону, приготування клею *Sikadur -330*, вкладання та ламінування тканини *SikaWrap -230 C/45*, приготування клею *Sikadur -30*, приклеювання *Sika CarboDur S-512*. Автор зробив висновки, що для досягнення ефективного підсилення за допомогою системи *Sika CarboDur S* та *SikaWrap* потрібно чітко

дотримуватись технологічного режиму. Ретельно виконувати всі етапи підсилення. Неодмінно потрібно дотримуватись останніх редакцій паспорту продуктів. Підсилення конструкцій за допомогою композитних стрічок на основі вуглецевих волокон – універсальний метод. Його ефективно використовувати у підсиленні бетону, дерева, металу та інших конструкцій. У цілому значне зменшення витрат на виконання підсилення досягається шляхом зменшення терміну виконання робіт, за допомогою простоти підсилення. Від цього зменшується витрати праці.

У статті [13] наведено результати експериментальних досліджень міцності закріплення композиційної стрічки на бетон при статичних та циклічних розтягуючих навантаженнях. Які служать, основою інших досліджень з підсилення [52-54].

Автор статті [14] ставить перед собою мету вивчення технологічних особливостей підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами при реконструкції споруд, з метою зменшення ваги, матеріалоємності, збереження зовнішнього вигляду після реконструкції, а також врахуючи вплив такого методу підсилення на всіх стейкхолдерів та беручи до уваги економічні фактори. Та доводить що основними цілями підсилення металевих конструкцій фіброармованими полімерами є збільшення або відновлення міцності на розтяг, збільшення або відновлення міцності на згин, підвищення втомної міцності. В роботі виконано огляд технологічних особливостей і актуальних проблем в області підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами, а також зачеплена історична перспектива цього методу реновації. Наведена таблиця мінімальних допусків по товщині дефекту які слід визначати неруйнівними методами контролю. У статті розглянуті проблеми методу підсилення конструкцій з використанням композитних матеріалів. Зазначено що в Україні відсутня нормативно-дослідна база, присвячена проблемі підсилення металевих будівельних конструкцій композитними матеріалами, тому є можливість використовувати виключно зарубіжний досвід і рекомендації при проектуванні

такого роду підсилень. Основний принцип розміщення композитних елементів підсилення полягає в паралельному розташуванні розтягуючим напруженням. Автор відзначив, що значний ефект від підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами може бути досягнутий при підсиленні балок покриття промислових будівель або великопрольотних конструкцій, які при підсиленні традиційними методами вимагають складних конструктивних рішень, великих витрат праці, зупинки технологічного процесу виробництва для виконання робіт із підсилення, вага підсилюючої конструкції часто виявляється значною. А для застосування композитних матеріалів для підсилення металевих конструкцій потребує лише встановлення легких риштувань (можлива робота автопідйомників), що не займає багато часу.

Проаналізувавши параметри композиційних матеріалів, можна зробити наступні основні висновки:

- композиційні матеріали володіють високою міцністю на розтяг та модулем пружності, порівнянним або навіть переважаючим аналогічні показники сталі і значно більшими за аналогічні показники як клеєної так і цільної деревини;
- щільність їх в 3 – 5 разів менша, ніж у сталі, і в 3 – 4 рази більша за щільність деревини;
- через свою малу щільність, практично не збільшують масу конструкції що підсилюється, а відповідно і постійне навантаження від власної ваги;
- в поєднанні з конструкцією що підсилюється чудово сприймає сейсмічні навантаження, а також ударні та вибухові навантаження;
- можуть повторяти практично будь які форми конструкцій які підсилюються;
- не потребують масивних пристосувань для їхнього монтажу, трудомісткість їхньої установки мінімальна;

- в багатьох випадках дозволяють виконувати роботи з ремонту та підсиленню будівельних конструкцій з мінімальними перервами в експлуатації споруди;
- легко вантажаться, транспортуються та доставляються безпосередньо до місця підсилення;
- можуть бути попередньо напружені в процесі влаштування на конструкцію що підсилюється.

У зв'язку з цим такі матеріали нашли широке застосування для відновлювання несучої спроможності та підсилення будівельних конструкцій різних інженерних споруд – промислових та житлових будівель, мостів труб, бункерів, причальних споруд, тунелів різного призначення, також використовуються для реставрації пам'ятників архітектури.

Враховуючи всі ці фактори, можна сказати, що підсилення будівельних конструкцій композитними матеріалами являє собою менш трудомісткий та енергозатратний процес порівняно з усіма іншими аналогічними методами підсилення. Ця обставина має важливе значення при ремонті та підсиленні багатьох конструкцій, наприклад мостових на автодорожніх та залізничних магістралях, коли їхня відмова (тимчасове припинення експлуатації) під час проведення ремонтних робіт призводить до значних фінансових втрат. Всім цим можна пояснити збільшуючий об'єм застосування в підсиленні конструкцій композиційних матеріалів в світі. Для прикладу в Швейцарії вони використовуються вже в більш ніж 80% випадках підсилення всіх залізобетонних будівельних конструкцій.

Тому планується провести дослідження взаємодії полотна та стрічок з композитних матеріалів із дерев'яними конструкціями, що прогнозовано повинно дати змогу збільшити несучу здатність останніх при зменшенні величини їхнього поперечного перерізу.

1.3. Аналіз досліджень застосування композитних стрічок з дерев'яними конструкціями.

Раніше було розглянуто успішне використання композитних полотен та стрічок в підсиленні таких конструкційних матеріалів як залізобетон та метал. Проте їх рекомендують використовувати і для підсилення конструкцій ще з багатьох матеріалів. Для прикладу дерев'яні конструкції також можна підсилювати такими полотнами та стрічками, але досліджень в цьому напрямку дуже мало.

В роботі [15] висвітлені питання несучої здатності та вогнестійкості армованих дерев'яних конструкцій. За допомогою експериментальних досліджень показано, що армування металевою стрічковою арматурою дерев'яних балок дає змогу збільшити майже в два рази їхню несучу здатність. Представлено три методи підсилення балки з клеєної деревини металевою стрічковою арматурою, а саме: балка армована металевою смугою 40x4 мм, з'єднання якої виконувалося за допомогою епоксидного клею, балка армована металевою смугою 40x4 мм, поставленою на ребро, з'єднання якої виконувалося за допомогою епоксидного клею та балка армована металевою смугою 40x4 мм, приєднання якої виконувалося за допомогою самонарізаючих гвинтів. Найбільш ефективним способом армування дерев'яних балок стрічковою арматурою виявилось встановлення її вертикально в площині дії згинального моменту. Також виконано порівняння результатів теоретичних розрахунків за методикою запропонованою Клименком В.З., та результатами, представлених авторами, експериментальних досліджень. Ще показано, що підвищення межі вогнестійкості дерев'яних балок, армованих зовнішньою стрічковою арматурою досягається за допомогою вогнезахисного покриття Ендотерм ХТ 150.

Автори статті [16] ставили перед собою завдання експериментально розглянути технологію виготовлення клеєних дерев'яних балок армованих стержневою арматурою та композитними стрічками. В роботі розглянуть експериментальні дослідження дерев'яної балки, армованої двома стержнями періодичного профілю Ø12 мм А500С, розташованих в стиснутій зоні в

спеціальних пазах, та композитною вуглепластиковою стрічкою фірми *Sika CarboDur S-512* наклеєною в розтягнутій зоні на двокомпонентний клей *Sikadur-30* та заанкерованої на опорних ділянках за допомогою полотна з вуглецевих волокон *SikaWrap-230C* на двокомпонентному клею *Sikadur-330* для уникнення відриву стрічки. Розроблено алгоритм виконання робіт. Детально розглянуто етапи приготування клеїв, підготовки та приклеювання полотна і стрічки. Для фіксації результату, після виготовлення армованої балки на неї закріплювали тензодатчики в зоні чистого згину. Також вказані таблиці з фізико-механічними характеристиками клеїв, полотна та стрічки. Автори зробили висновки, що композитна арматура *Sika CarboDur* є досить ефективним способом збільшити несучу здатність дерев'яних конструкцій, та рекомендували, що для досягнення позитивного результату потрібно дотримуватись технологічного режиму та виконувати основні вимоги підготовки матеріалів.

Як бачимо, з наведеного вище огляду, досліджень підсилення конструкцій з цільної та клеєної деревини композитними матеріалами в Україні дуже мало, і вони спрямовані лише на конкретну конструкцію, - на балку. Тому є актуальним дослідження використання в підсиленні дерев'яних конструкцій (балок, рам, *CLT* – плит) композитних матеріалів – у вигляді стержнів та стрічок. Проте паралельно з моїми у світі проводять дослідження впливу композитних матеріалів на дерев'яні конструкції які наведені в роботах [55-68]. Це доводить доцільність проведення таких досліджень в Україні.

1.4. Висновки по розділу 1.

1. Проведений аналіз сучасного стану досліджень армованих дерев'яних конструкцій дає змогу зрозуміти, що є необхідність детального вивчення таких конструкцій підсилених композитними стрічками.

2. На теперішній час практично відсутні в Україні дослідження спільної роботи композитних стрічок з дерев'яними конструкціями, та їхній взаємний вплив, що унеможлиблює розробку методики розрахунку.

3. Рекомендації з проектування дерев'яних конструкцій з армуванням композитними стрічками відсутні, тому їхня розробка призведе до збільшення застосування таких конструкцій в будівлях та спорудах різного значення.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ЧИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ З КЛЕЄНОЇ ТА ПЕРЕХРЕСНО-КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ

2.1. Аналіз напружено-деформованого стану балок з клеєної деревини підсиленних композитними стрічками

Одним з основних видів ККД є балки, тому їх дослідженню приділено чимало уваги. Для збільшення жорсткості та підвищення міцності балочних конструкцій з ККД запропоновано виконувати їх підсилення шляхом армування. Є багато різних методів армування таких конструкцій (сталевую арматурою, пластинами, композитною арматурою тощо) [69]. Найменш досліджений з них це армування композитними стрічками.

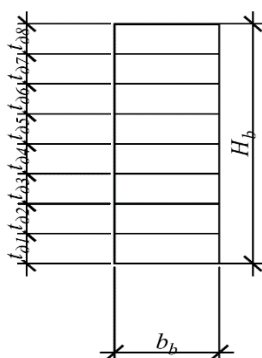
Для подальшого, детального аналізу напружено-деформованого стану елементів з клеєної деревини прямокутного перерізу підсиленого композитними стрічками проведено ряд чисельних досліджень за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [70-78] в програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР [79-81] із використанням об'ємних та плоских скінченних елементів, враховуючи особливості роботи та структуру балок з клеєної деревини та композитних стрічок із вуглецевих волокон.

В цій роботі представлено дослідження напружено-деформованого стану балок з КД підсиленних композитними стрічками в порівнянні з балками з КД без підсилення за допомогою моделювання їх в ПК ЛІРА-САПР із використанням об'ємних та плоских скінченних елементів (СЕ). Та апробацією результатів через порівняння досліджуваних елементів з різною довжиною при дії різного рівномірно розподіленого по довжині навантаження. Результати моделювання композитних стрічок з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S 1012* плоскими СЕ в ПК ЛІРА-САПР висвітлено в [82].

Об'єктом чисельних досліджень було обрано балки прямокутного поперечного перерізу склеєні з дошок одного класу міцності з підсиленням композитними стрічками (рис. 2.1 (б)) та без нього (рис. 2.1 (а)) на двох шарнірних

опорах, завантажені рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю: 2 кН/м, 4 кН/м, 6 кН/м, 8 кН/м та прольотами: 4 м, 6 м, та 8 м.

а)



б)

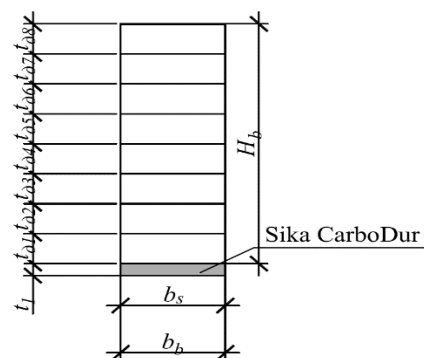


Рис. 2.1. Геометрична схема поперечного перерізу балки: а - без підсиленням; б - підсилена композитною стрічкою.

Поперечний переріз балок складається з восьми шарів дошок деревини одного класу міцності $C 35$, які для чисельних досліджень, моделювались об'ємними СЕ №36. Загальні розміри поперечного перерізу балок прийнято $H = 24$ см, $b = 10$ см, з наступними механічними властивостями: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 13000$ МПа, модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,mean} = 430$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 810$ МПа. При моделюванні балок з підсиленням композитними стрічками *Sika CarboDur S1012*, які змодельовано плоскими СЕ №44, додатково задавались їх механічні характеристики: модуль пружності вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 170\ 000$ МПа.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 2 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.2.) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.3.).

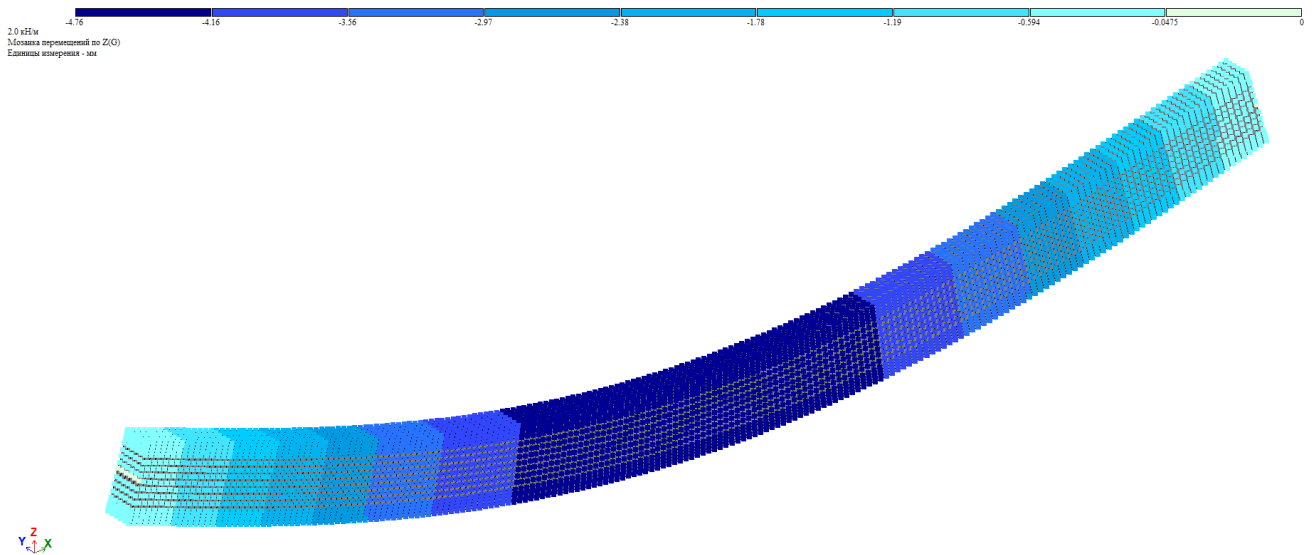


Рис. 2.2. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 2 кН/м.

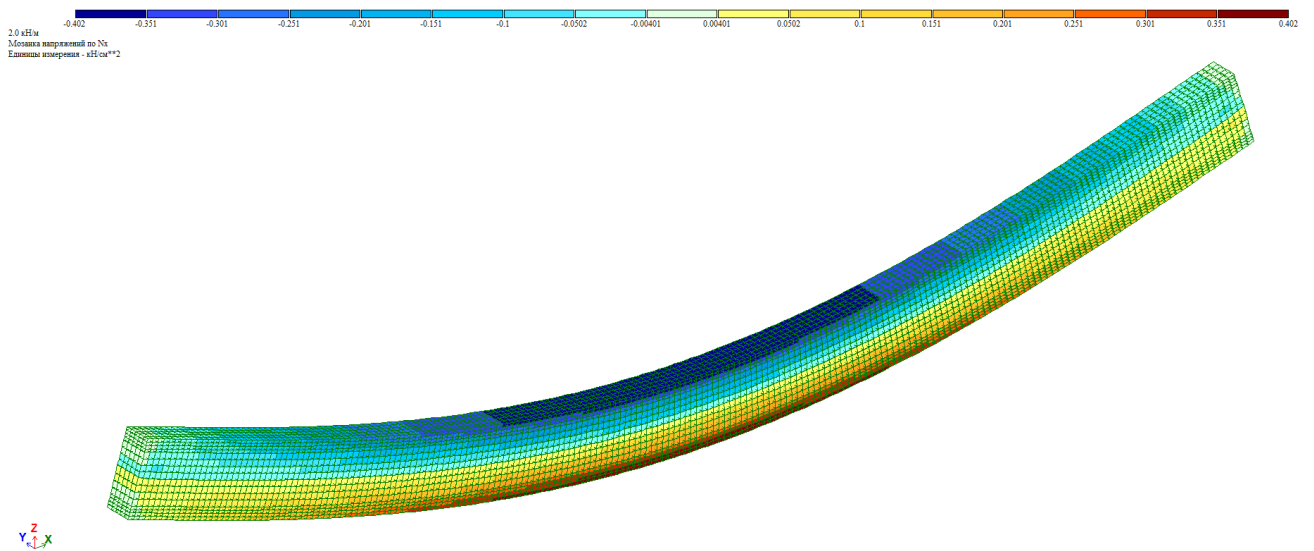


Рис. 2.3. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 2 кН/м.

Та відповідні ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.4) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.5) при аналогічного навантаженні балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м.

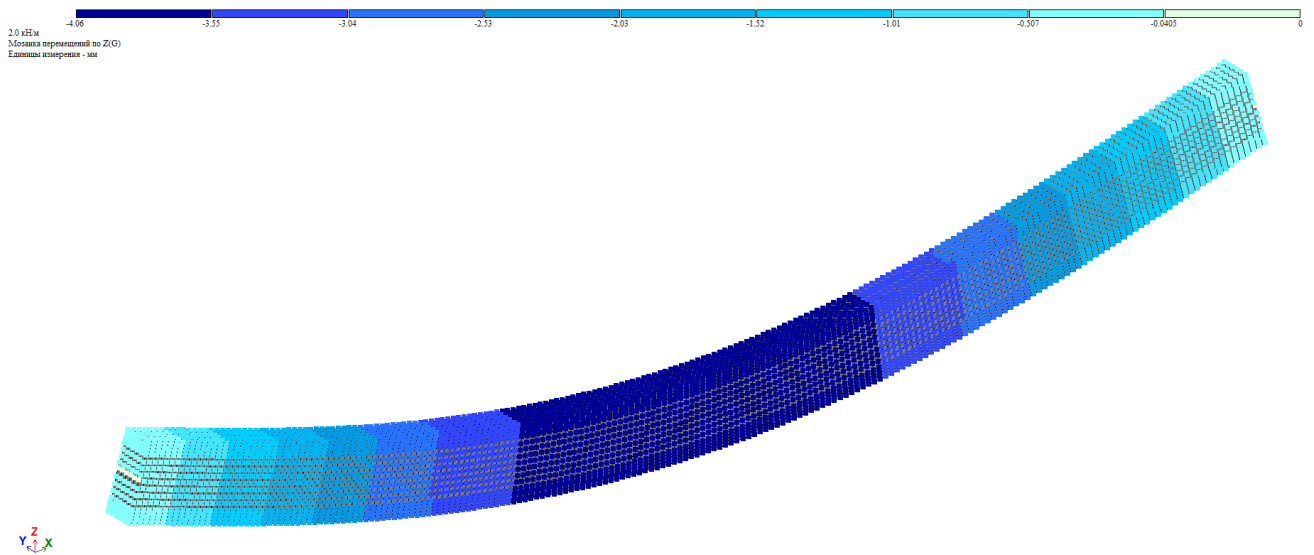


Рис. 2.4. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженні в 2 кН/м

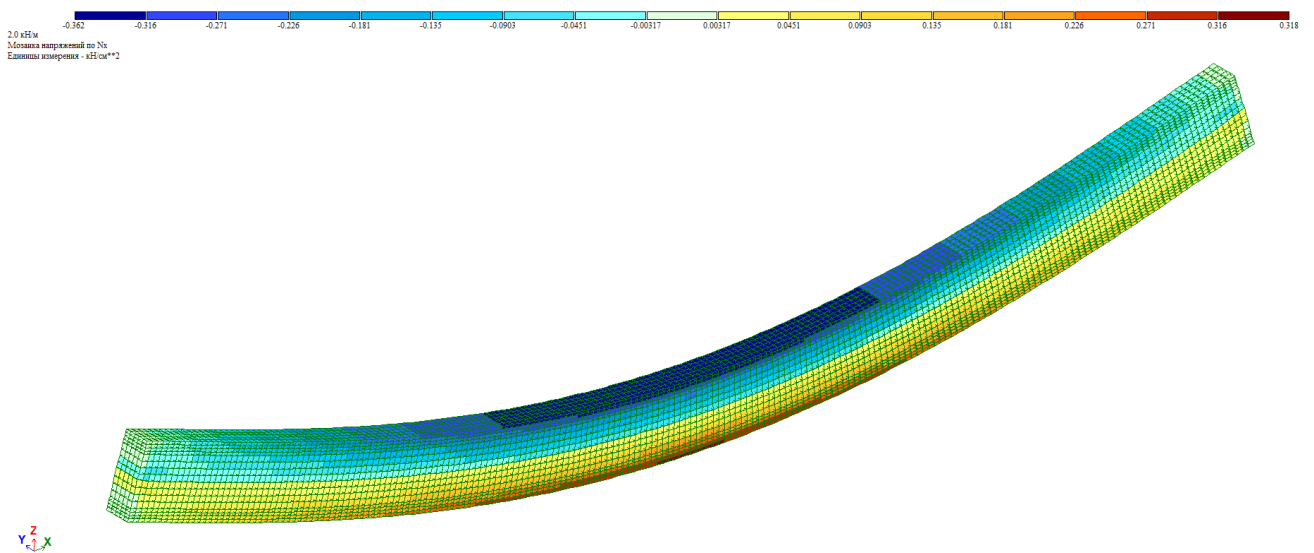


Рис. 2.5. Ізополя нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженні в 2 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольотів 4, 6 та 8 м, що досліджувались при рівномірно розподіленім навантаженні 2 кН/м представлено в табл. 2.1.

Табл. 2.1. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для балок з клеєної деревини з підсиленням та без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 2 кН/м.

Прольот, м		4		6		8	
Методики розрахунку	$EI (W_x)$, кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без підсилення	4,76	0,402	25,1	0,901	72,3	1,60
МСЕ з об'ємними СЕ №36 та плоскими СЕ №44	підсилена композитною стрічкою	4,06	0,318	21,0	0,701	61,2	1,27
Відсоткова різниця		17%	26%	20%	29%	18%	26%

З проведених чисельних досліджень зрозуміло, що для балок з клеєної деревини одного класу міцності з підсиленням композитними стрічками при рівномірно розподіленому навантаженні в 2,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується більше ніж на 25%, за аналогічні балки без підсилення композитними стрічками. А вертикальні деформації таких балок при армуванні стрічками зменшуються більш ніж на 15%.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 4 кН/м, отримали ізополі вертикальних деформацій (рис. 2.6) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.7).

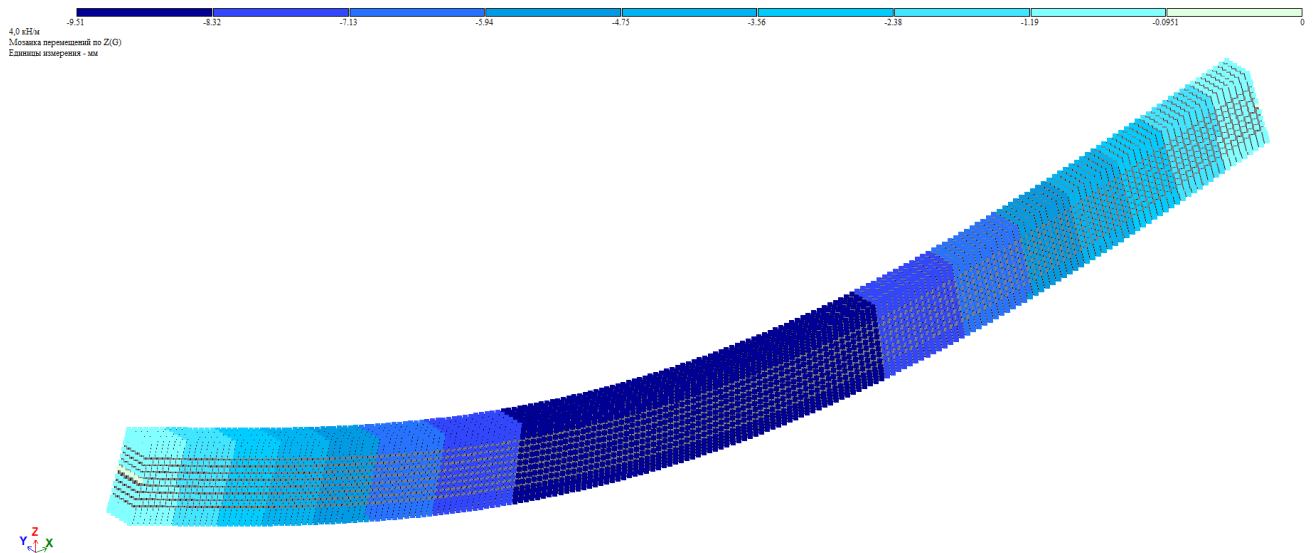


Рис. 2.6. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 4 кН/м.

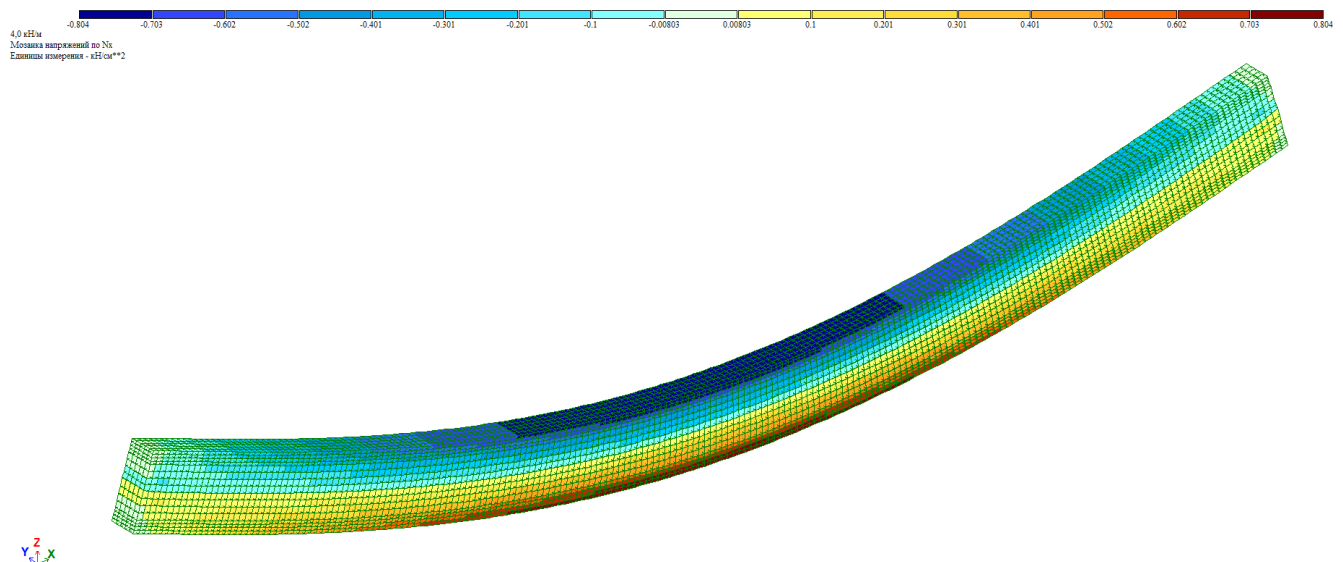


Рис. 2.7. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 4 кН/м.

Та відповідні ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.8) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.9) при аналогічного навантаженні балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м.

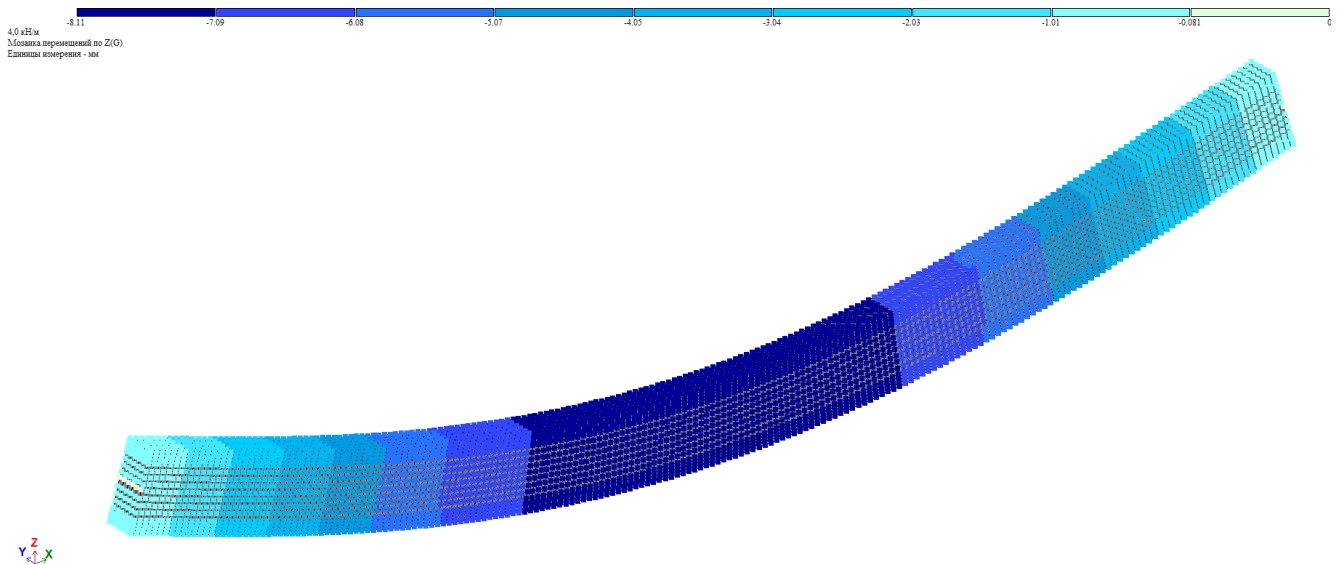


Рис. 2.8. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженням в 4 кН/м.

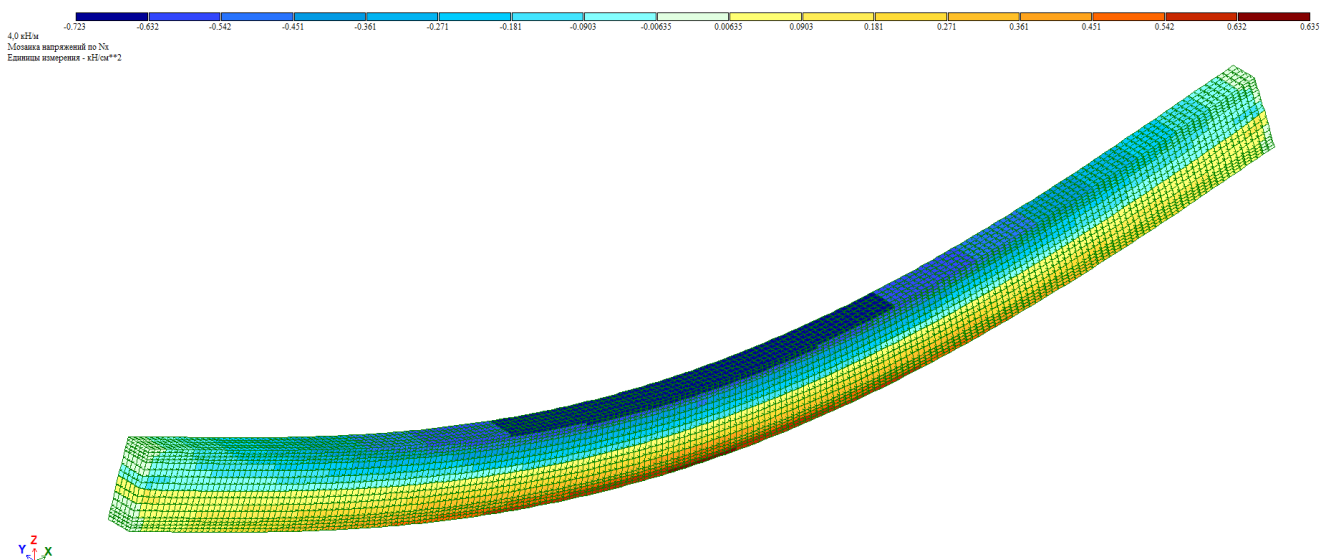


Рис. 2.9. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженням в 4 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольотів 4, 6 та 8 м, що досліджувались при рівномірно розподіленім навантаження 4 кН/м представлено в табл. 2.2.

Табл. 2.2. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для балок з клеєної деревини з підсиленням та без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 4 кН/м.

Прольот, м		4		6		8	
Методики розрахунку	EI (W_x), кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без підсилення	9,51	0,804	50,1	1,8	145,0	3,20
МСЕ з об'ємними СЕ №36 та плоскими СЕ №44	підсилена композитною стрічкою	8,11	0,635	42,0	1,4	122,0	2,54
Відсоткова різниця		17%	27%	19%	29%	19%	26%

Для підсилених балок при рівномірно розподіленому навантаженні в 4,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується більш ніж на 25%, ніж аналогічні балки без підсилення композитними стрічками. А вертикальні деформації таких балок при армуванні стрічками зменшуються майже на 20%.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини без підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 6 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.10) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.11).

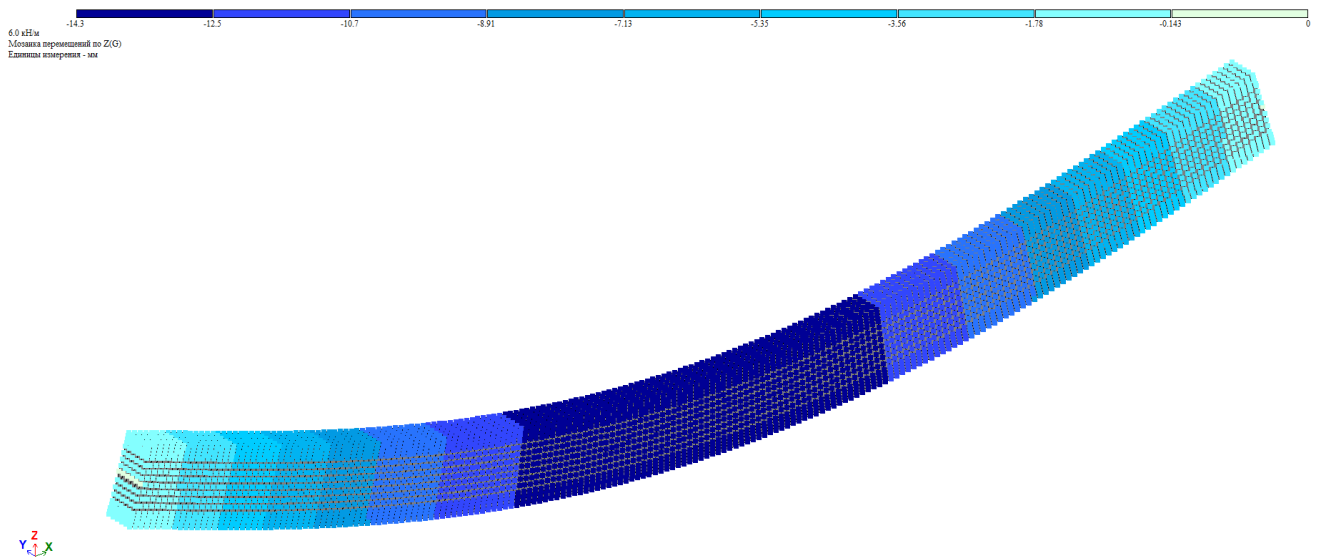


Рис. 2.10. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 6 кН/м.

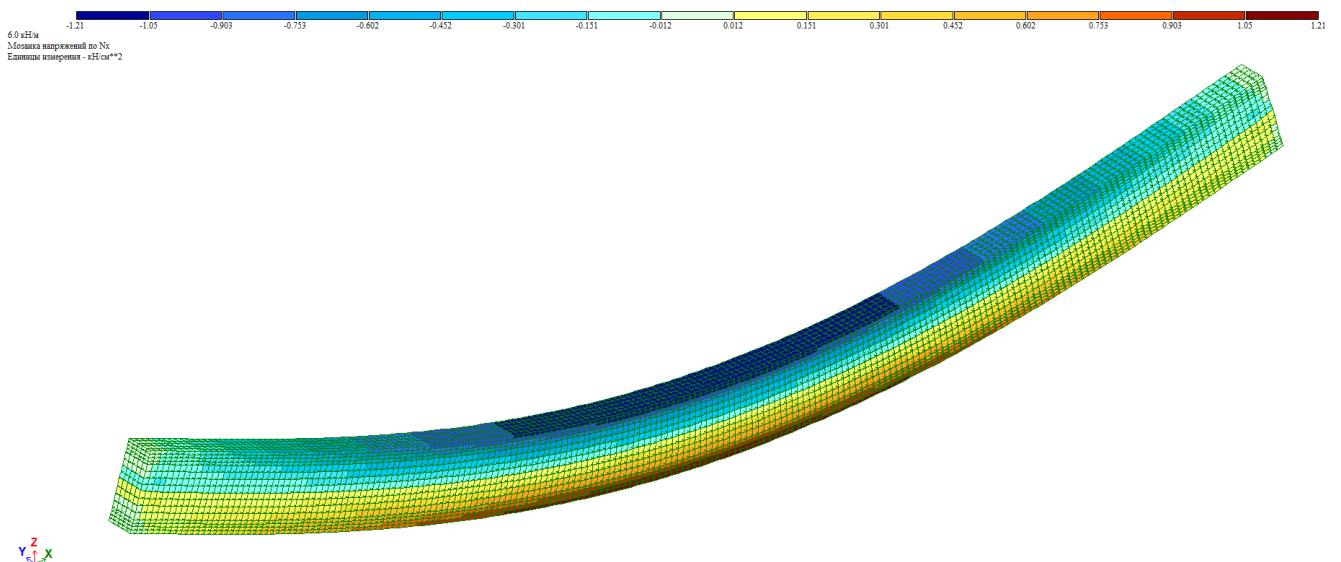


Рис. 2.11. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 6 кН/м.

Та відповідні ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.12) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.13) при аналогічного навантаженні балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м.

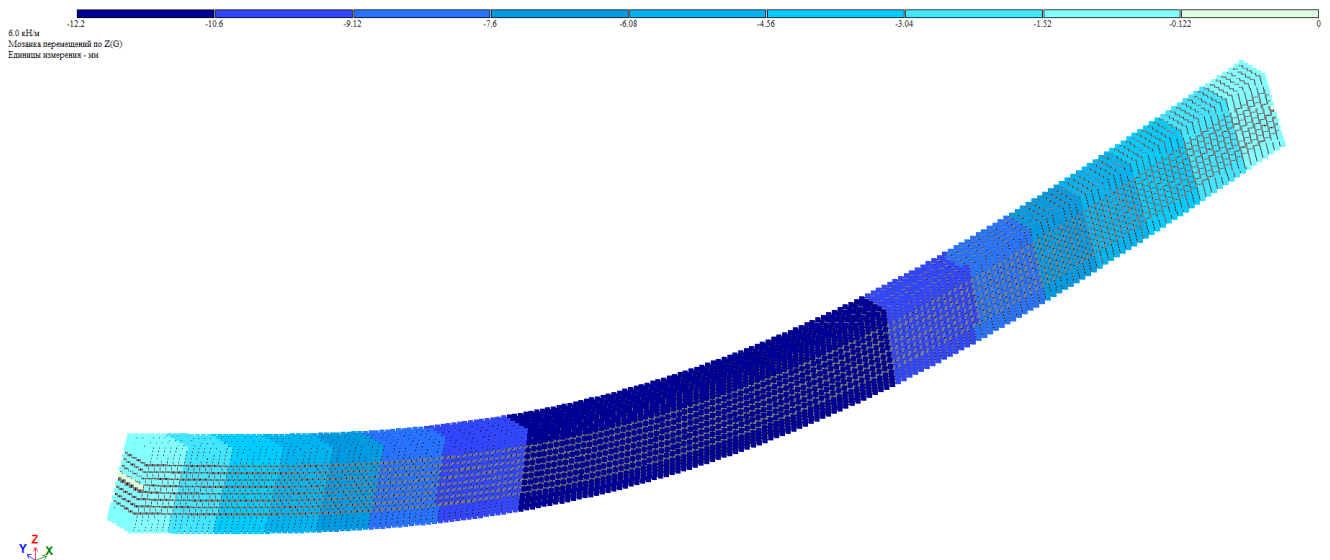


Рис. 2.12. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженням в 6 кН/м.

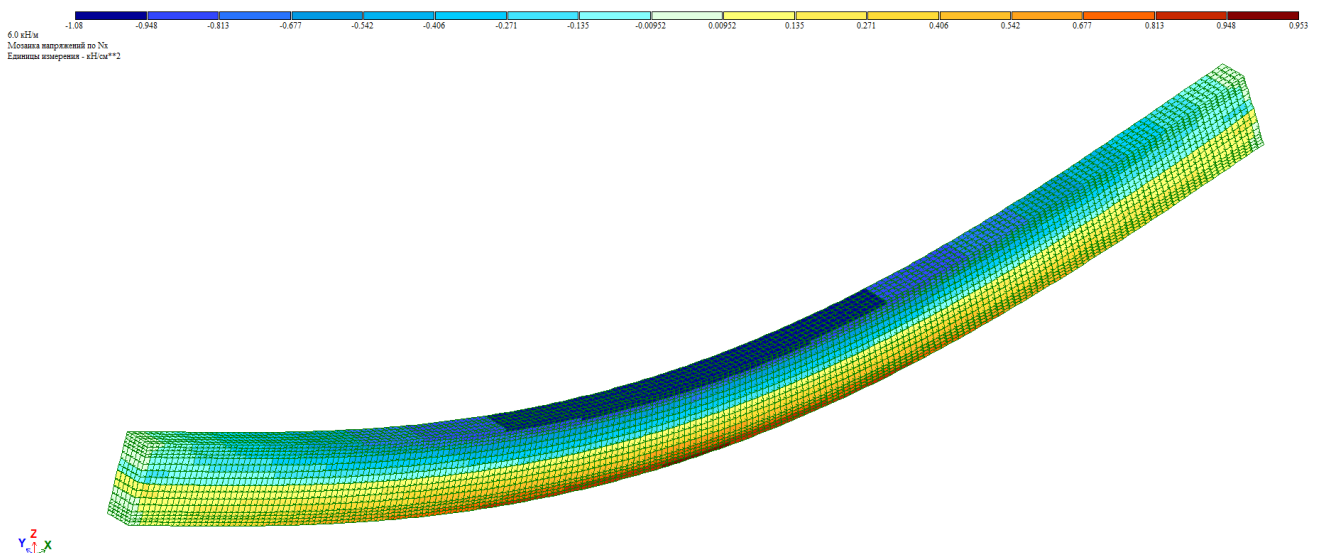


Рис. 2.13. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженням в 6 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини з підсилення композитними стрічками та без нього для прольотів 4, 6 та 8 м, що досліджувались при рівномірно розподіленім навантаження 6 кН/м представлено в табл. 2.3.

Табл. 2.3. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для балок з клеєної деревини з підсиленням та без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 6 кН/м.

Прольот, м		4		6		8	
Методики розрахунку	EI (W_x), кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без підсилення	14,3	1,21	75,2	2,7	217,0	4,8
МСЕ з об'ємними СЕ №36 та плоскими СЕ №44	підсилена композитною стрічкою	12,2	0,953	63,0	2,1	184,0	3,8
Відсоткова різниця		17%	27%	19%	29%	18%	26%

Для підсилених балок при рівномірно розподіленому навантаженні в 6,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується від 26 до 29%, ніж аналогічні балки без підсилення композитними стрічками. А вертикальні деформації таких балок при армуванні стрічками зменшується в межах 17-19%.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 8 кН/м, отримали ізополі вертикальних деформацій (рис. 2.14) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.15).

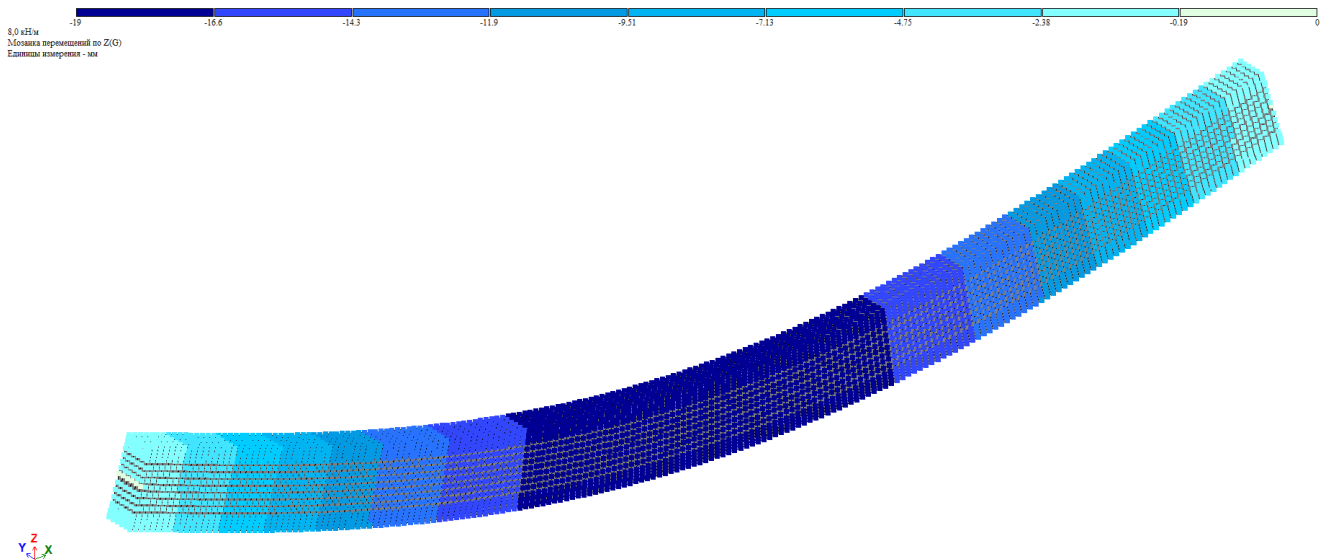


Рис. 2.14. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 8 кН/м.

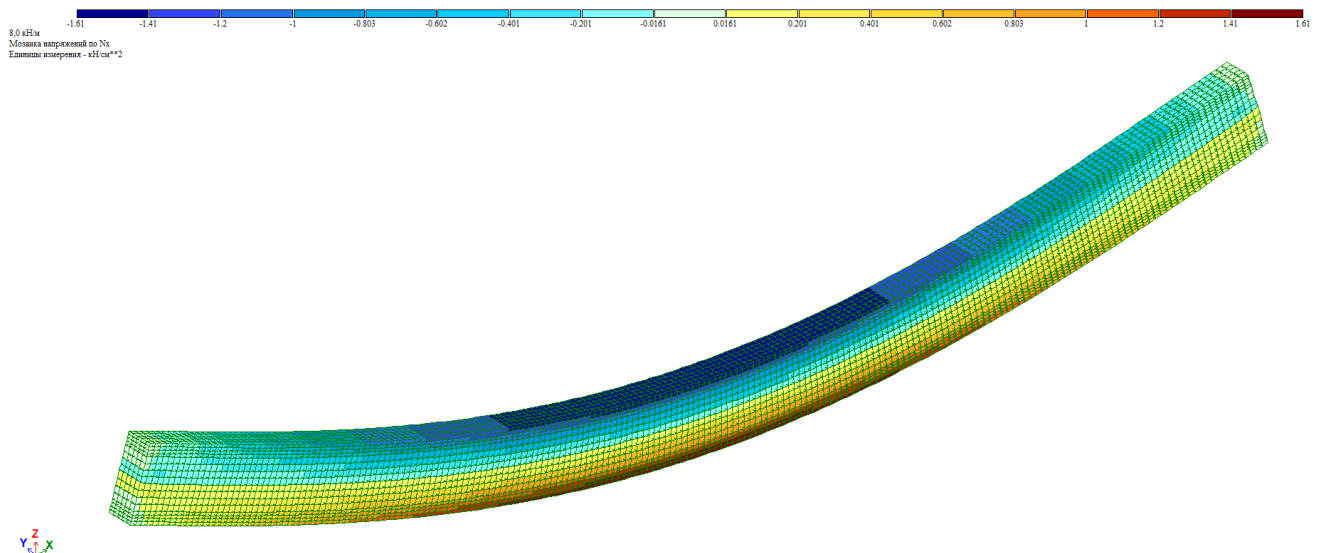


Рис. 2.15. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 6 кН/м.

Та відповідні ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.16) та нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.17) при аналогічного навантаженні балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м.

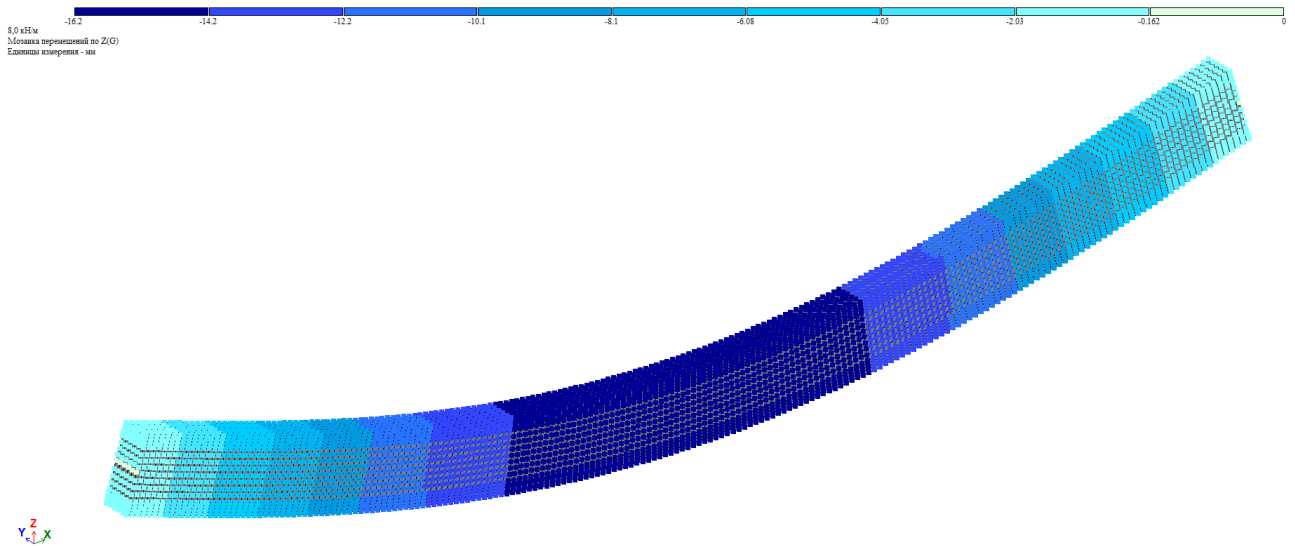


Рис. 2.16. Ізополя вертикальних деформацій балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженні в 6 кН/м.

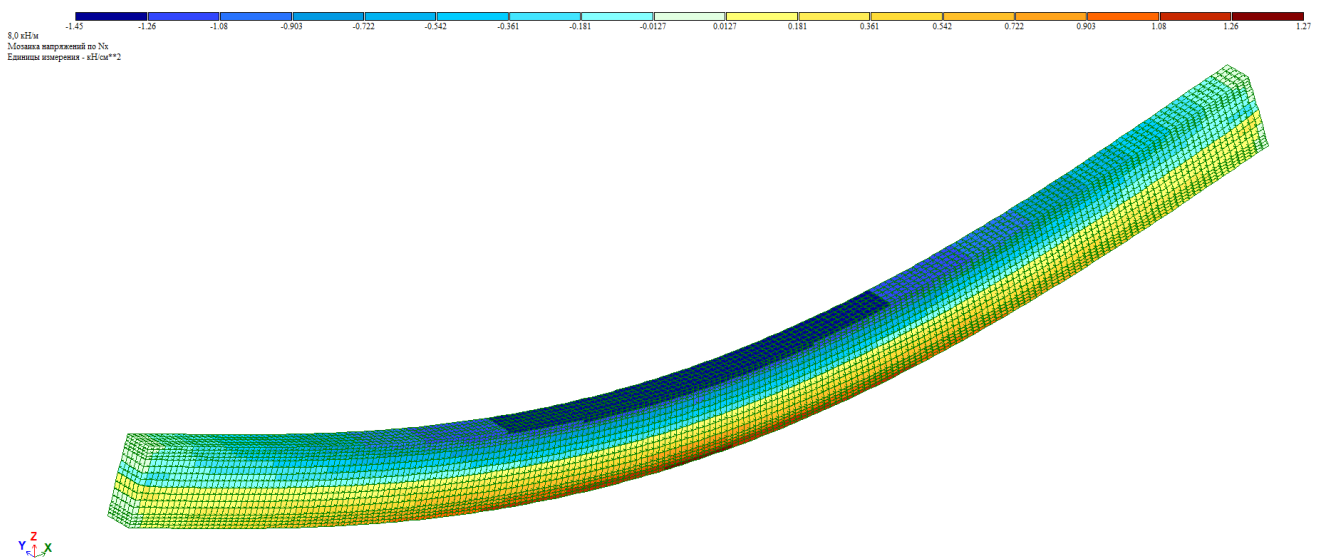


Рис. 2.17. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленім навантаженні в 8 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольотів 4, 6 та 8 м, що досліджувались при рівномірно розподіленім навантаженні 8 кН/м представлено в табл. 2.4.

Табл. 2.3. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для балок з клеєної деревини з підсиленням та без підсилення композитними стрічками прольотом 4 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 6 кН/м.

Прольот, м		4		6		8	
Методики розрахунку	EI (W_x), кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без підсиленням	19	1,61	100,0	3,6	289,0	6,4
МСЕ з об'ємними СЕ №36 та плоскими СЕ №44	підсилена композитною стрічкою	16,2	1,27	84,0	2,8	245,0	5,07
Відсоткова різниця		17%	27%	19%	29%	18%	26%

Для підсилених балок при рівномірно розподіленому навантаженні в 8,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується також від 26 до 29%, ніж аналогічні балки без підсилення композитними стрічками. А вертикальні деформації таких балок при армуванні стрічками зменшуються в межах 17-19%.

Розглянемо характер зміним вертикальних деформацій відносно збільшення рівномірно розподіленого навантаження для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольоту 4 м, (рис 2.18).

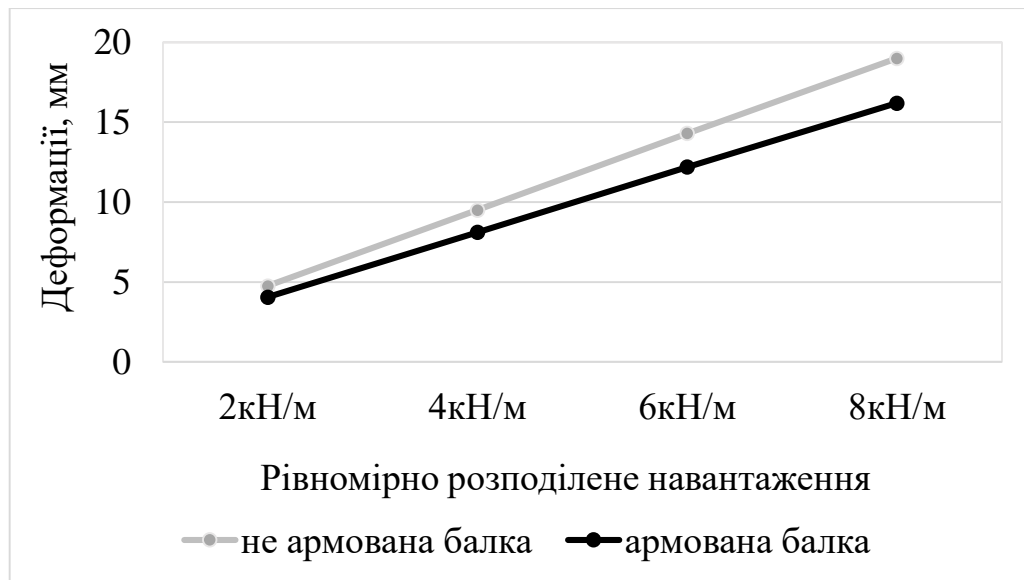


Рис. 2.18. Графік відношення вертикальних деформацій до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках прольотом 4 м.

Розглянемо характер зміним вертикальних деформацій відносно збільшення рівномірно розподіленого навантаження для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольоту 6 м, (рис 2.19).

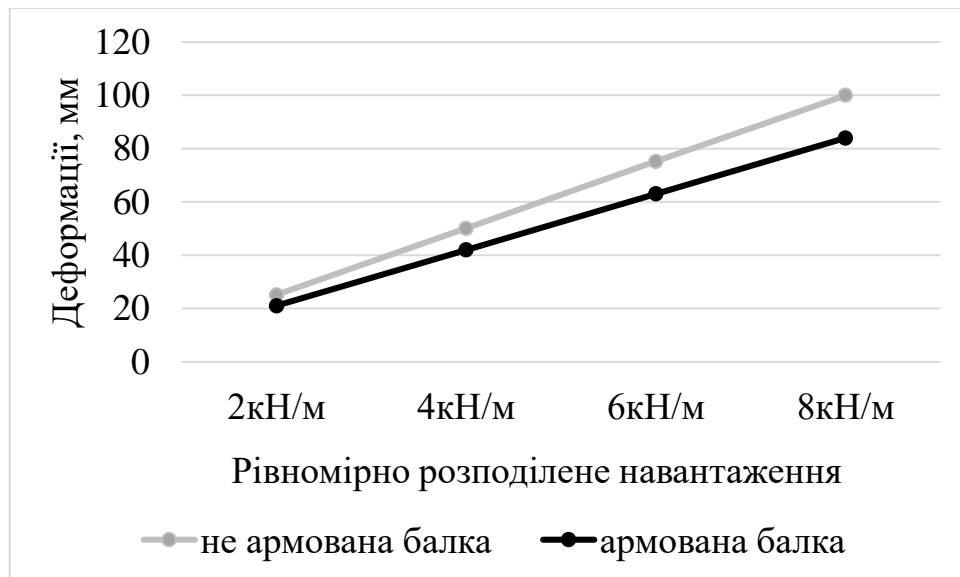


Рис. 2.19. Графік відношення вертикальних деформацій до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках прольотом 6 м.

Розглянемо характер зміним вертикальних деформацій відносно збільшення рівномірно розподіленого навантаження для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольоту 8 м, (рис 2.20).

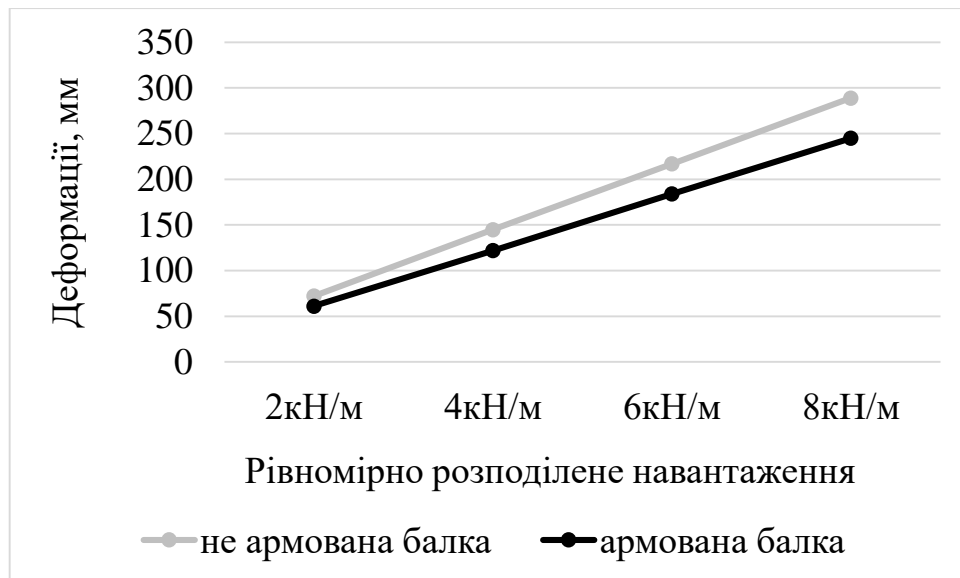


Рис. 2.20. Графік відношення вертикальних деформацій до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках прольотом 8 м.

З наведених графіків відношення вертикальних деформацій до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках видно, що при збільшенні навантажень, вертикальні деформації зменшуються в балках підсилених композитними стрічками по відношенню до аналогічних не підсилених балок зменшуються.

Розглянемо характер відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини відносно збільшення рівномірно розподіленого навантаження для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольоту 4 м, (рис 2.21).

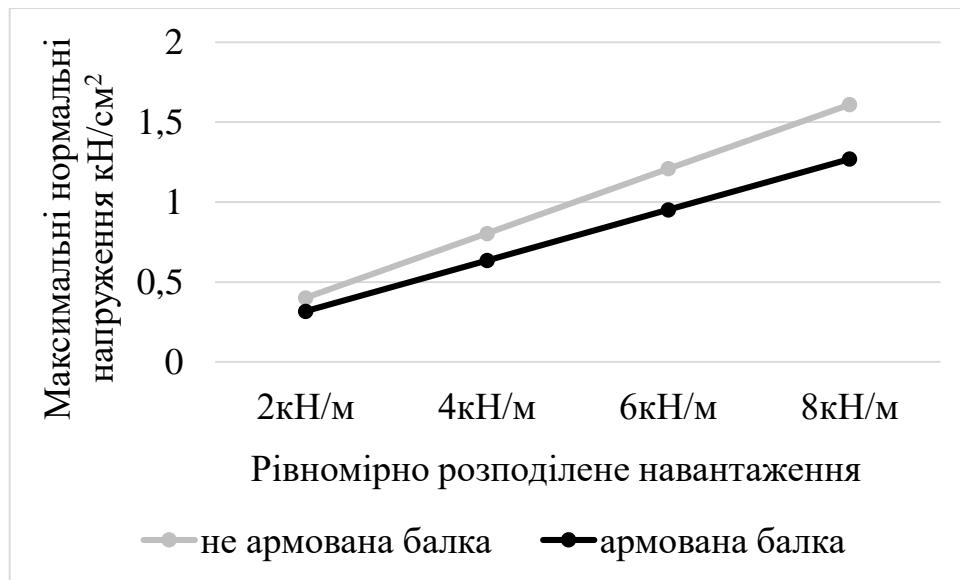


Рис. 2.21. Графік відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках прольотом 4 м.

Розглянемо характер відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини відносно збільшення рівномірно розподіленого навантаження для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольоту 6 м, (рис 2.22).

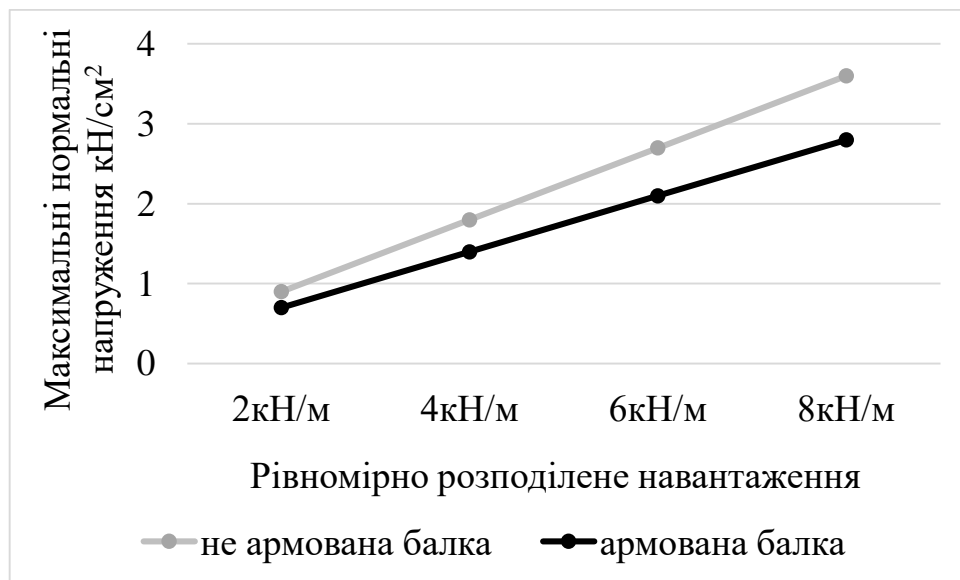


Рис. 2.22. Графік відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках прольотом 6 м.

Розглянемо характер відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини відносно збільшення рівномірно розподіленого навантаження для балок з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками та без нього для прольоту 8 м, (рис 2.23).

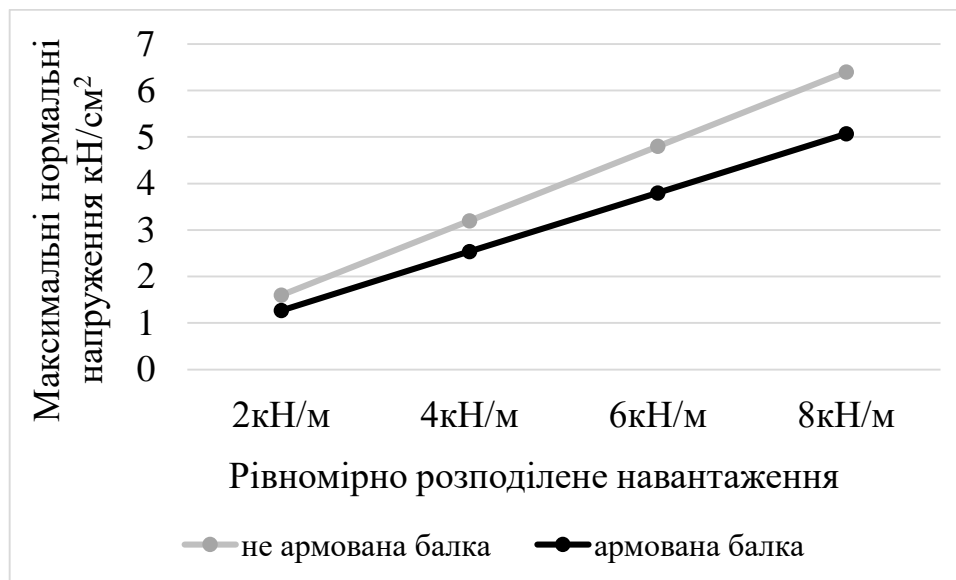


Рис. 2.23. Графік відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках прольотом 8 м.

З наведених графіків відношення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини до рівномірно розподілених навантажень в досліджуваних балках видно, що при збільшенні навантажень, максимальні нормальні напруження вздовж волокон деревини в балках підсилені композитними стрічками по відношенню до аналогічних не підсилені балок зменшуються.

Як видно з одержаних результатів за розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР балки з склеєних дошок класу міцності С35, що моделювались об'ємними скінченними елементами СЕ №36 підсилені композитними стрічками з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012*, що моделювались плоскими скінченними елементами СЕ №44 мають в середньому на 18% менші вертикальні деформації та на 27% менші нормальні напруження від аналогічних балок з клеєної деревини не підсилені композитними стрічками.

Та у зв'язку з відсутністю в вітчизняних нормативних документах [18-19] вказівок щодо розрахунку чи будь який інший інженерний підхід до конструкцій з клеєної деревини, підсилених композитними стрічками є актуальною перспектива даних досліджень. Окремого вивчення потребує підсилення композитними стрічками інших конструкцій з клеєної деревини таких, як рами, арки, ферми і плити з перехресно-клеєної деревини.

2.2. Аналіз напружено-деформованого стану тришарнірних рам з клеєної деревини підсилених композитними стрічками.

Рами відносяться до плоских розпірних конструкцій. Сучасні клеєні рами за часту є суцільними. Наскрізні (решітчасті) конструкції цього класу застосовувалися в основному із цільної деревини. В даний час вони практично не використовуються через відсутність їхнього промислового виготовлення. Рамні конструкції переважно складаються з прямолінійних елементів та допускають наявність жорстких (рамних) вузлів. Жорсткі вузли тришарнірних рам прийнято називати карнизними, тому що їх доводиться конструювати саме під карнизом будівлі. Ці вузли забезпечують спільну роботу ригелів та стійок, що зменшує згинальні моменти в ригелі. Крім того, легко доводиться, що найбільший згинальний момент у карнизних вузлах рам менше, ніж максимальний момент, у балках з однаковими прольотами. Їхнє співвідношення рівне співвідношенню висоти стійки рами до стрілки підйому коньякового шарніру відносно опорних шарнірів. Відповідно на відміну від балок, рамами можна перекривати прольоти більшої величини.

Розвиток дерев'яних рам безпосередньо пов'язаний з інженерними рішеннями жорстких вузлів. В публікаціях [82-83] широко розглянуто як класифікація рам так і різновиди карнизних вузлів.

Цілісно клеєні вузли з'єднання ригеля зі стійками на зубчастий шип під кутом дуже компактні і досить жорсткі. Передача силових потоків від ригеля до стійок відбувається у цих вузлах практично без відхилень їх траєкторій у бокових напрямках, що було у вузлах з накладками з фанери. Найбільш доцільним, з погляду збалансованої міцності, є клейове з'єднання на зубчастий шип вздовж волокон.

Проте саме карнизні вузли мають найбільший поперечний переріз в рамках з клеєної деревини, що потребує значних витрат матеріалів [84-88]. Тому актуальними є дослідження в сфері підсилення таких вузлів для зменшення їхнього поперечного перерізу. На дану тему опубліковано статтю в співавторстві з Михайловським Д.В. [89].

Композитні матеріали є одними з провідних в підсиленні конструкцій на даний час тому, що більшість композитних матеріалів добре опираються багатьом хімічним впливам: лугам, кислотам, хлоридам, сульфатам, нітратам та іншим. Це дозволяє їх використовувати, як в промисловому та сільськогосподарському будівництві де має місце безпосередній вплив зовнішнього середовища на конструкцію підсилену композитними матеріалами, так і в житлових будівлях без шкоди для жителів.

За основу досліджень обрано ламаноклеєні тришарнірні рами з клеєної деревини прольотами 12, 18, 24 м (рис. 2.24) з цілісно клеєними карнизними вузлами з'єднання ригеля з стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута (рис. 2.25).

Данні дослідження аналізу напружено-деформованого стану рам з клеєної деревини підсилені композитними стрічками виконуються для вирішення ряду проблем:

1. Аналізу підсилення карнизного вузла ламано-клеєної тришарнірної рами композитними стрічками.
2. Поширення використання композитних стрічок з іншими конструкціями клеєної деревини окрім балок.

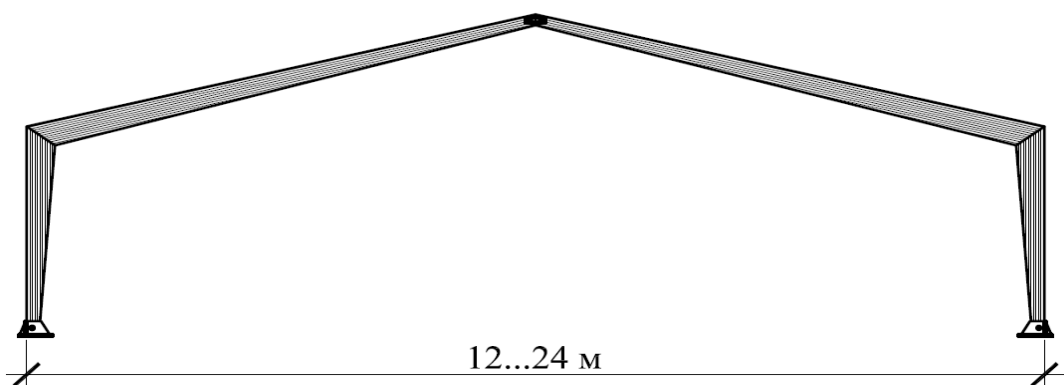


Рис. 2.24. Ламано-клеєні тришарнірні рами з клеєної деревини, прольотами від 12, 18, 24 м.

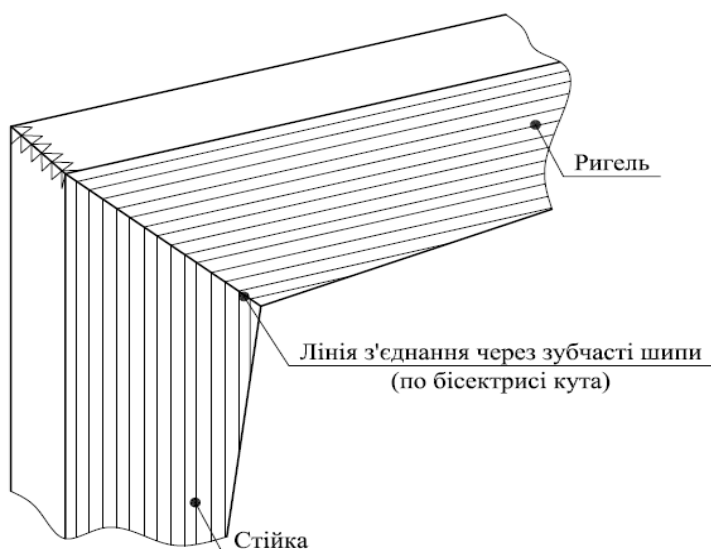


Рис. 2.25. Цілісно клеєний карнизний вузол з'єднання ригеля зі стійкою через зубчастий шип по бісектрисі кута.

Аналіз напружено-деформованого стану виконується за допомогою моделюванням в ПК ЛІРА-САПР ламано-клеєних тришарнірні рам з КД з цілісно клеєними карнизними вузлами з з'єднанням ригеля із стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута підсилених композитними стрічками та порівнюючи з аналогічними рамами без підсилення.

Розглянемо порівняння ламано-клеєної тришарнірної рами прольотом 12 м, з клеєної деревини класу міцності $GL\ 36h$ з модулем пружності вздовж волокон $E_{0,mean} = 14700$ МПа з цілісно клеєними карнизними вузлами з'єднання ригеля з стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута на та аналогічної рами з наклеюванням на верхню та нижню грані карнизних вузлів композитних стрічок (рис. 2.26) *Sika CarboDur S1512* з модулем пружності вздовж волокон $E_{0,mean} = 170\ 000$ МПа.

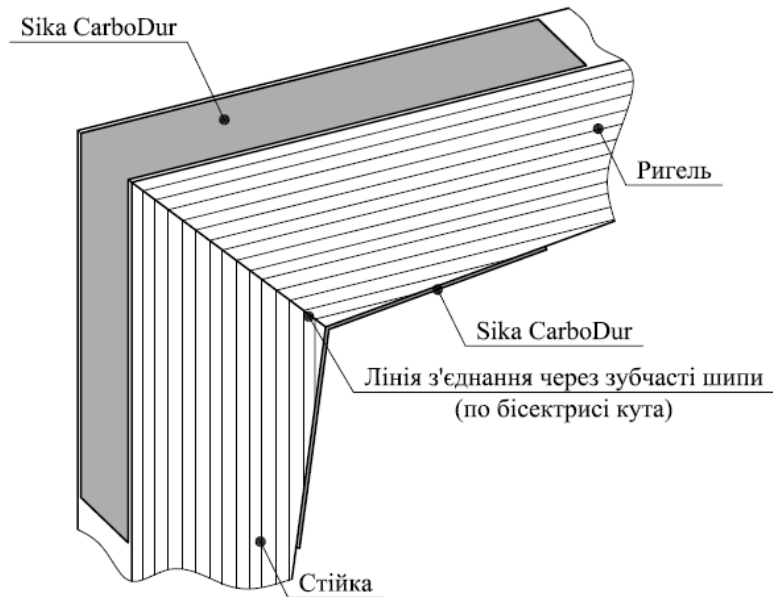


Рис. 2.26. Цілісно клеєний карнизний вузол з'єднання ригеля з стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута з наклеюванням на верхню та нижню грані композитних стрічок *Sika CarboDur S1512*.

В програмному комплексі ЛІРА-САПР змодельовали плоскими скінченними елементами СЕ №44 рами з клеєної деревини прольотом 12 м, висотою 4,5 м (рис. 2.27.). Змінний поперечний переріз підібраний відповідно до п.13.3 ДБН В.2.6-161:2017 [19], та має такі габарити:

- карнизний вузол $h_1 \times b = 0,6 \times 0,15$ м;
- гребеневий вузол $h_2 \times b = 0,12 \times 0,15$ м;
- опорний вузол $h_3 \times b = 0,24 \times 0,15$ м;

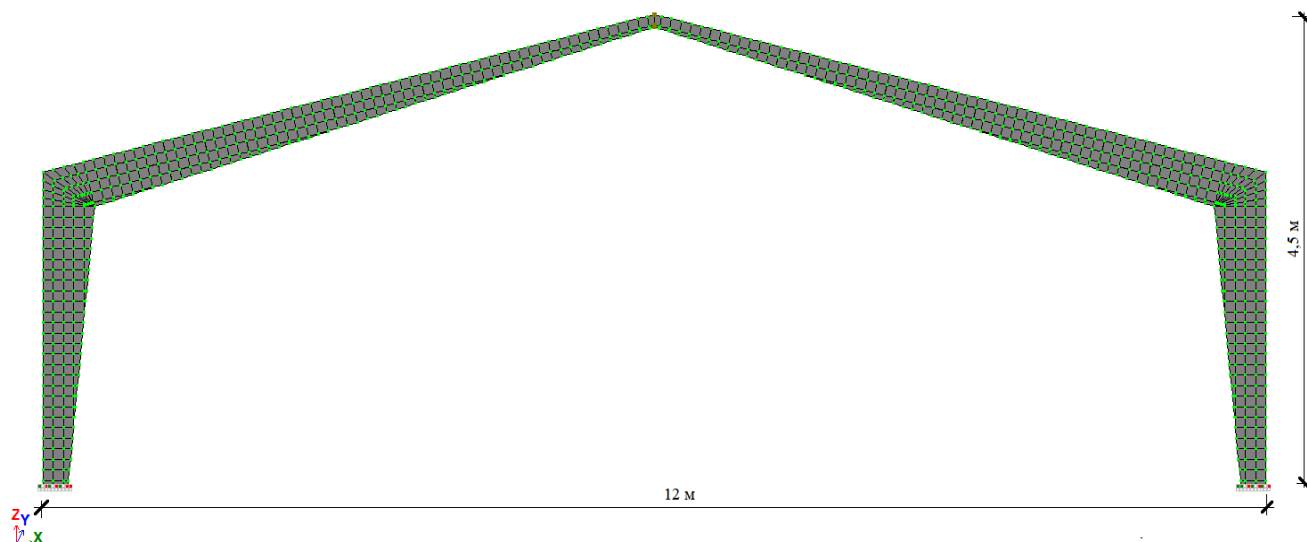


Рис. 2.27. Рами з клеєної деревини прольотом 12 м, висотою 4,5 м, без підсилення.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для ламано-клеєної тришарнірної рами прольотом 12 м, при рівномірно розподіленим навантаженням в 10 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.28.) та максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні (рис. 2.29).

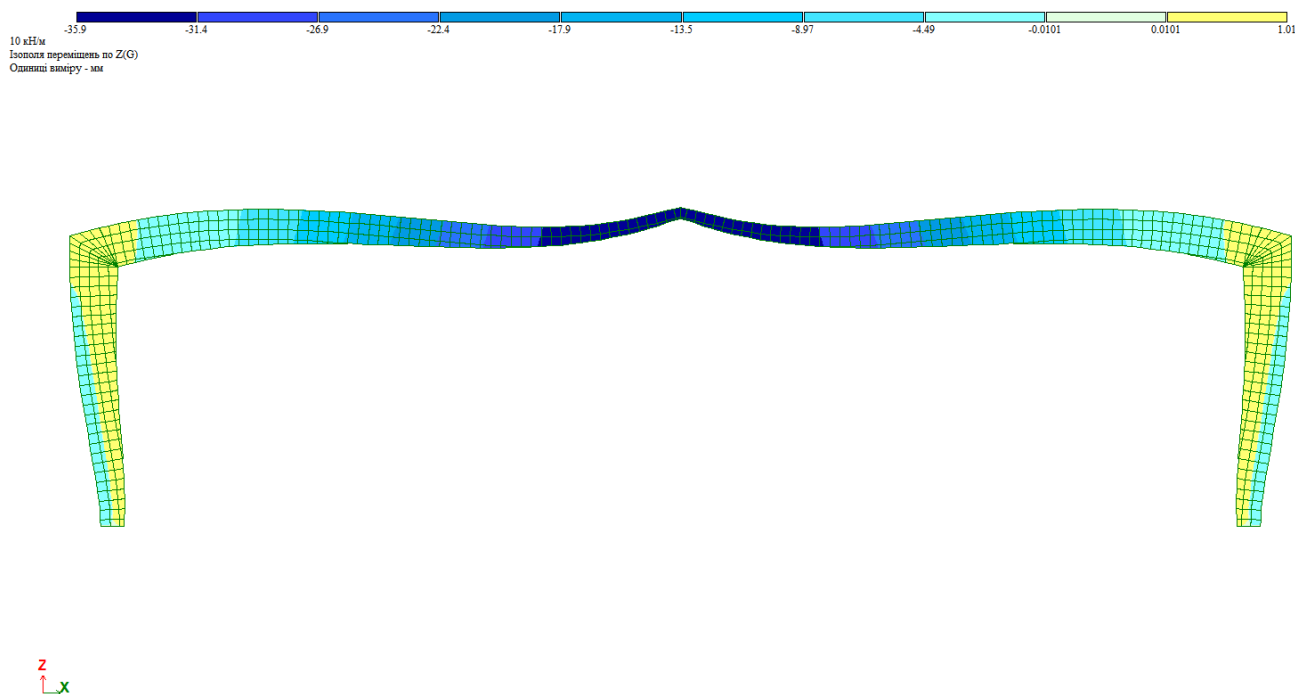


Рис. 2.28. Ізополя вертикальних деформацій рам з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 12 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

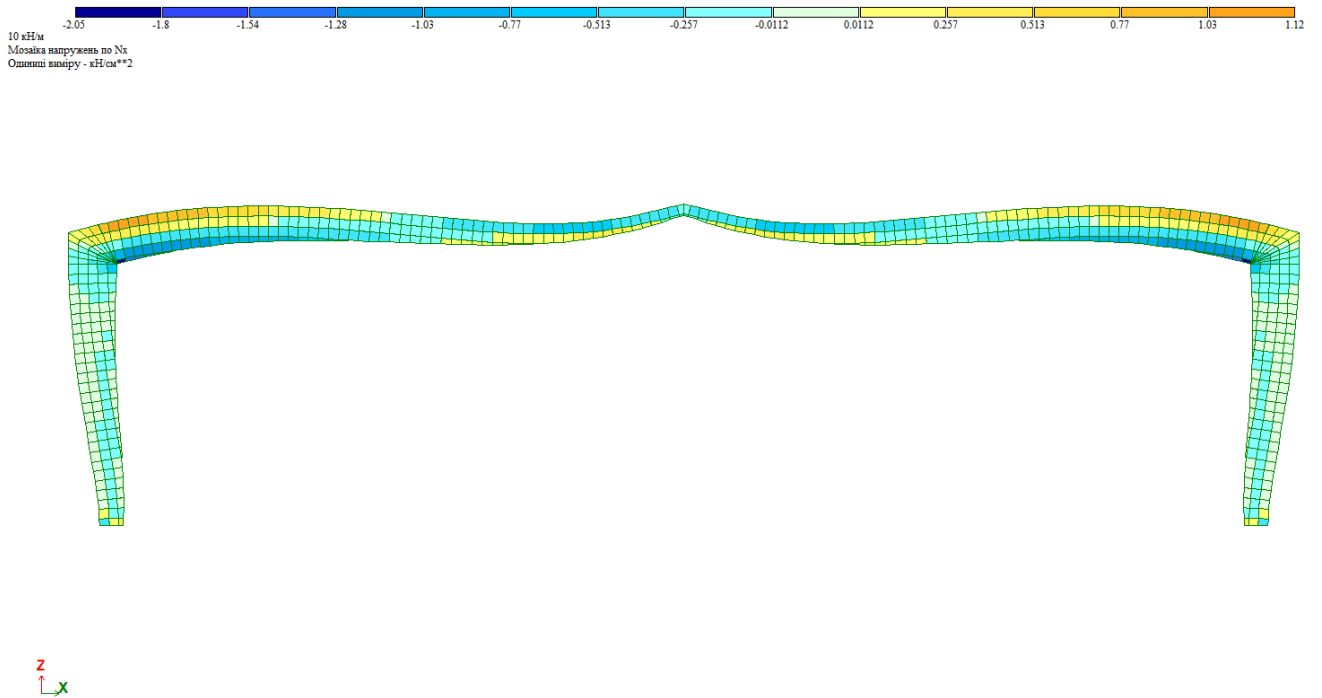


Рис. 2.29. Ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні в рамах з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 12 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

Аналогічно змодельовані рами з КД підсилені композитними стрічками (рис. 2.30) які в свою чергу моделювались стержневими скінченними елементами СЕ №10

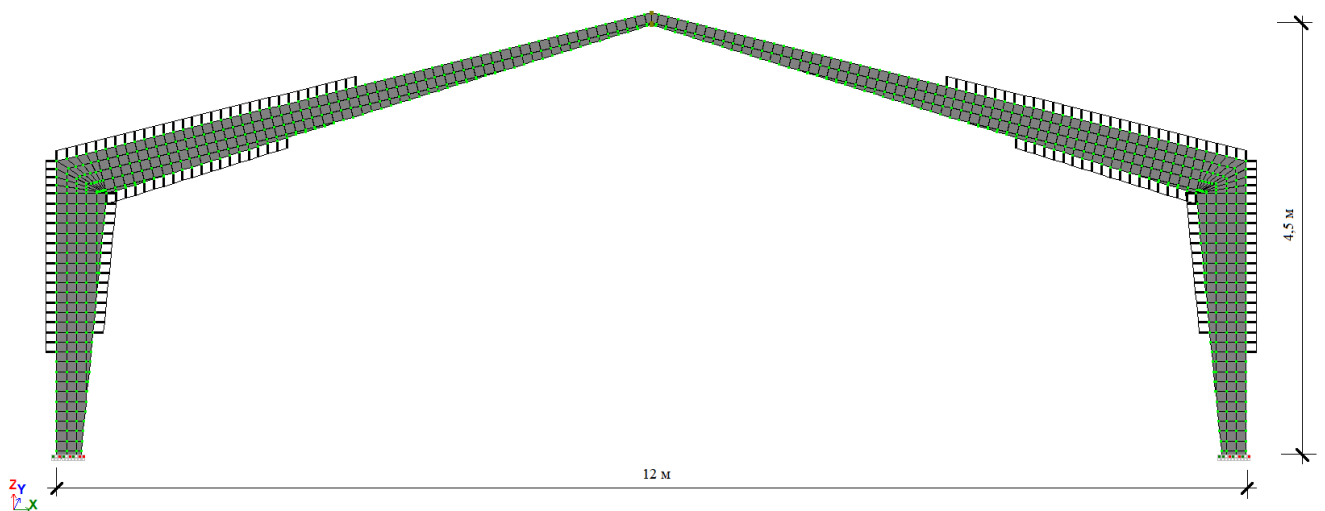


Рис. 2.30. Рами з клеєної деревини прольотом 12 м, висотою 4,5 м, підсилені композитними стрічками *Sika CarboDur S1512*.

Ізополя вертикальних деформацій показано на рис. 2.31, а ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні на рис. 2.32 при аналогічному навантаженні рам з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 12 м.

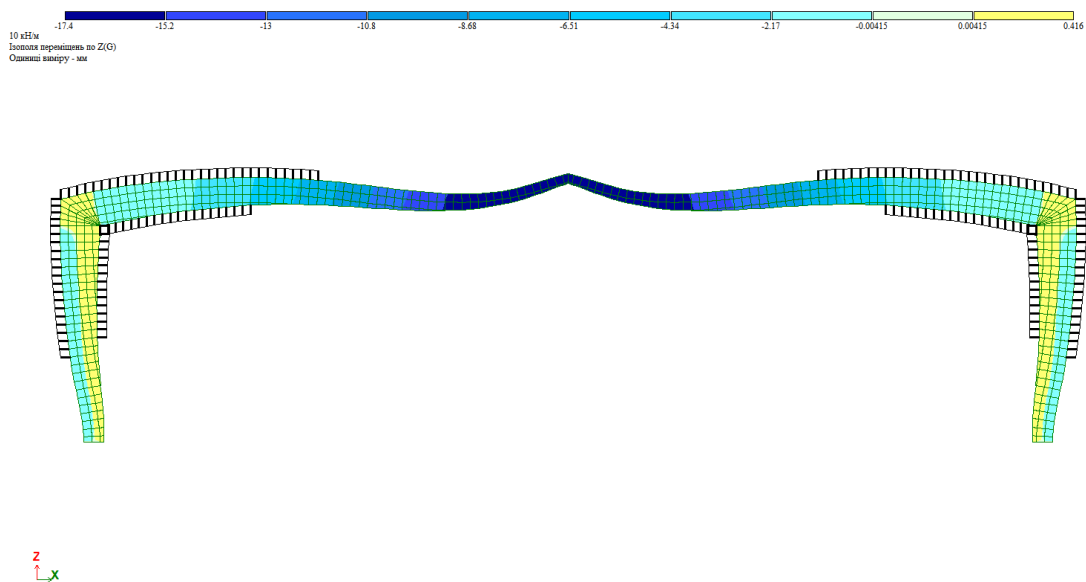


Рис. 2.31. Ізополя вертикальних деформацій рам з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 12 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

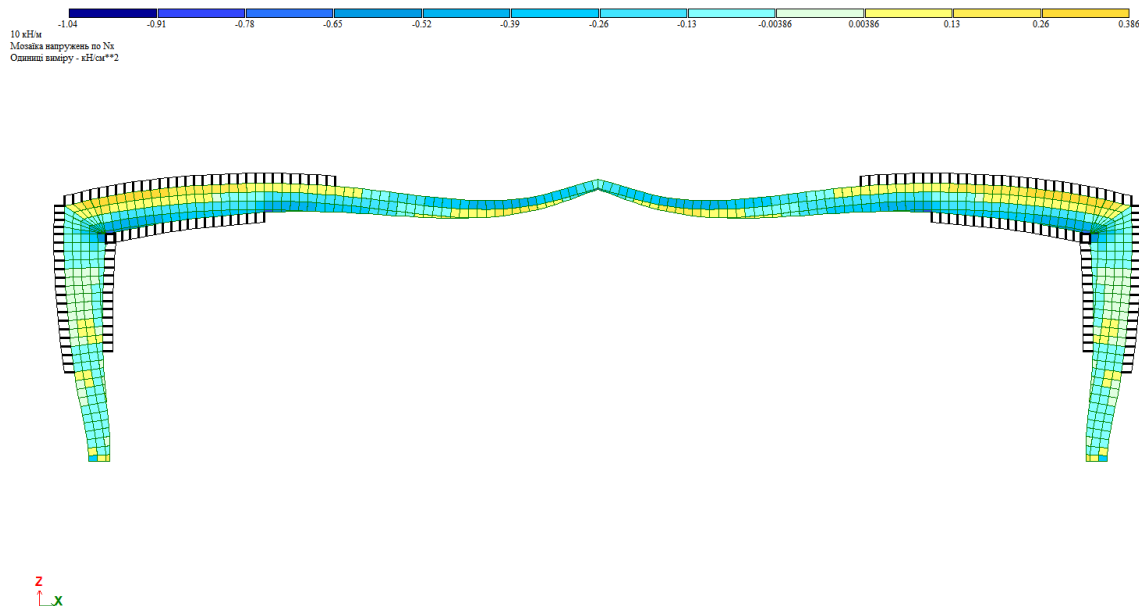


Рис. 2.32. Ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні в рамах з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 12 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

Для апробації результатів на досліджувані рами окрім прикладених рівномірно розподілених навантажень в 10 кН/м, ще прикладались рівномірно розподілені навантаження в 14 кН/м та 18 кН/м, а отримані результати, для більш наглядного сприйняття зведені, в таблицю 2.4.

Табл. 2.4. Значення вертикальних деформацій та максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні для тришарнірних рам з клеєної деревини прольотом 12 м.

Тип рами	Навантаження, кН/м					
	10		14		18	
	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
Без підсилення	35,9	1,12	50,3	1,57	64,7	2,02
Підсилена композитною стрічкою	17,4	0,386	24,3	0,541	31,3	0,695
Відсоткова різниця	52%	66%	52%	66%	52%	66%

З отриманих результатів чисельних розрахунків рам з клеєної деревини прольотом 12 м бачимо, що наклеювання композитних стрічок на верхню та нижні грані карнизних вузлів дозволяє в середньому на 52% зменшити вертикальні деформації, на 66% зменшити нормальні максимальні напруження в розтягнутій зоні ригеля.

Наступною для дослідження було обрано ламано-клеєну тришарнірну раму прольотом 18 м, з клеєної деревини класу міцності $GL\ 36h$ з модулем пружності вздовж волокон $E_{0,mean} = 14700$ МПа, з цілісно клеєними карнизними вузлами з'єднання ригеля з стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута на та аналогічної рами з наклеюванням на верхню та нижню грані карнизних вузлів композитних

стрічок *Sika CarboDur S1512* з модулем пружності вздовж волокон $E_{0,mean} = 170\,000$ МПа.

В програмному комплексі ЛІРА-САПР змодельовали плоскими скінченними елементами СЕ №44 рами з клеєної деревини прольотом 18 м, висотою 4,5 м, (рис. 2.33). Змінний поперечний переріз підібраний відповідно до п.13.3 ДБН В.2.6-161:2017 [19], та має такі габарити:

- карнизний вузол $h_1 \times b = 0,9 \times 0,23$ м;
- гребеневий вузол $h_2 \times b = 0,18 \times 0,23$ м;
- опорний вузол $h_3 \times b = 0,36 \times 0,23$ м.

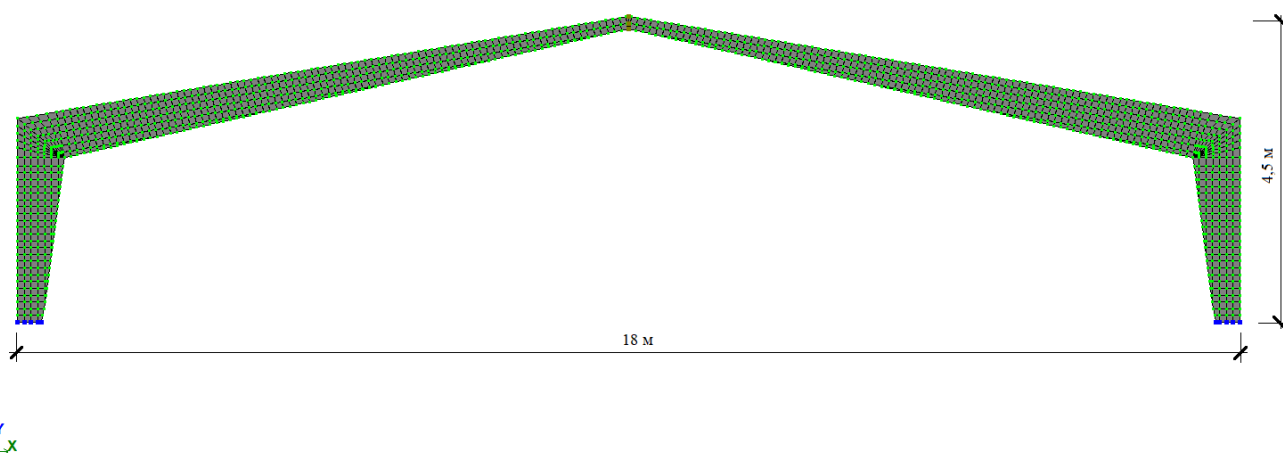


Рис. 2.33. Рами з клеєної деревини прольотом 18 м, висотою 4,5 м, без підсилення.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для ламано-клеєної тришарнірної рами прольотом 18 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.34) та максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні (рис. 2.35).

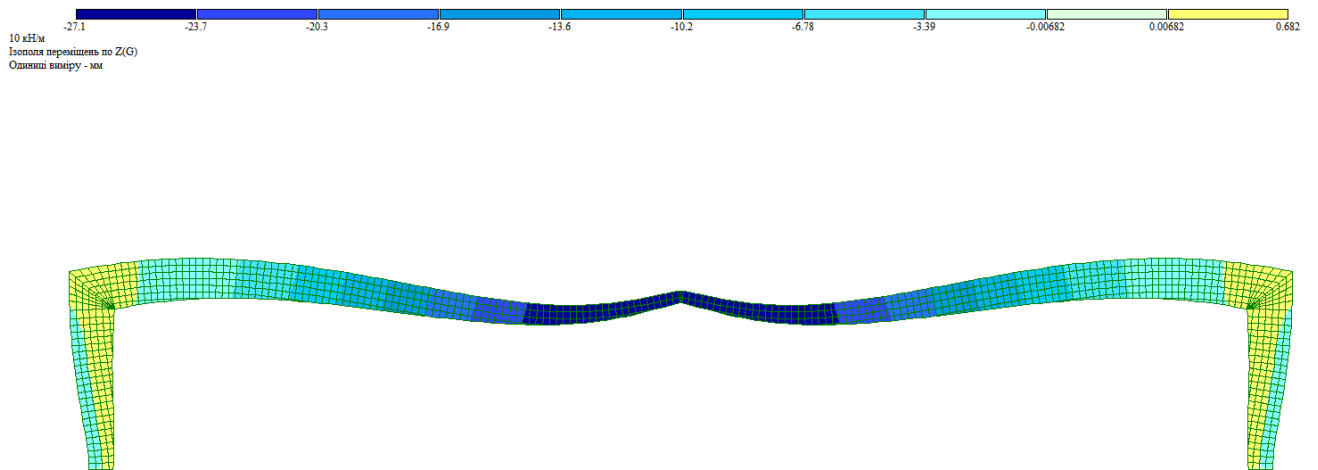


Рис. 2.34. Ізополя вертикальних деформацій рам з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 18 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

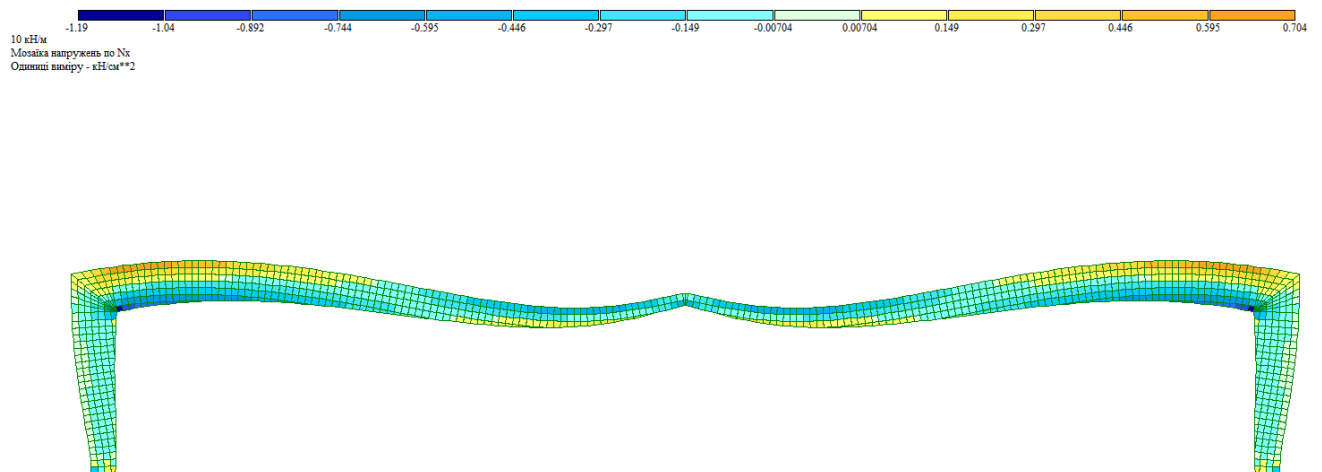


Рис.2.35. Ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні в рамах з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 18 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

Аналогічно змодельовані рами з клеєної деревини підсилені композитними стрічками (рис. 2.36) які в свою чергу моделювались стержневими скінченними елементами СЕ №10.

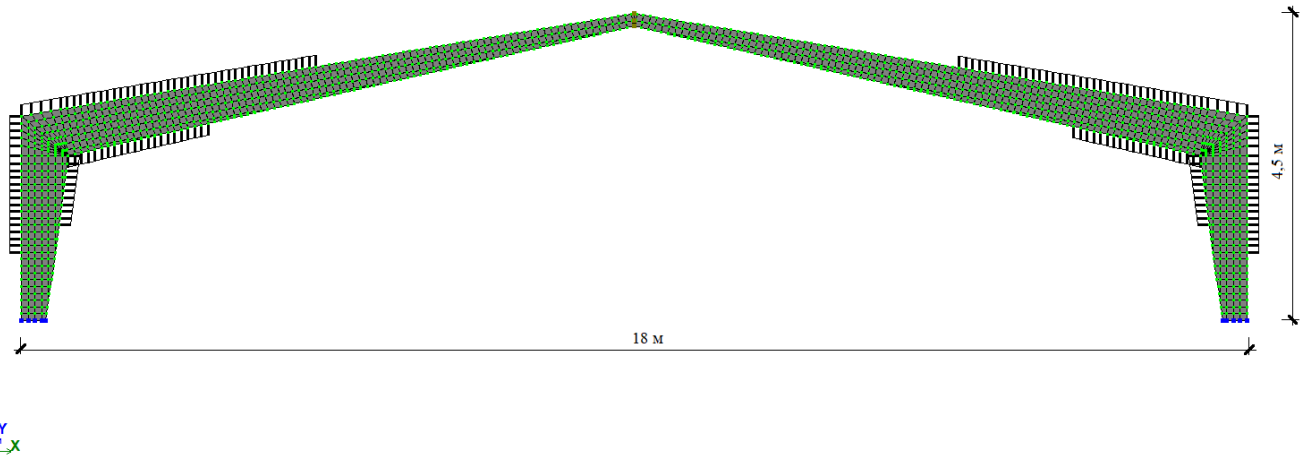


Рис. 2.36. Рами з клеєної деревини прольотом 18 м, висотою 4,5 м, підсилені композитними стрічками *Sika CarboDur S1512*.

Отримані, за результатами розрахунку, ізополя вертикальних деформацій наведено на рис. 2.37, а ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні на рис. 2.38 при аналогічному навантаженні рам з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 18 м.

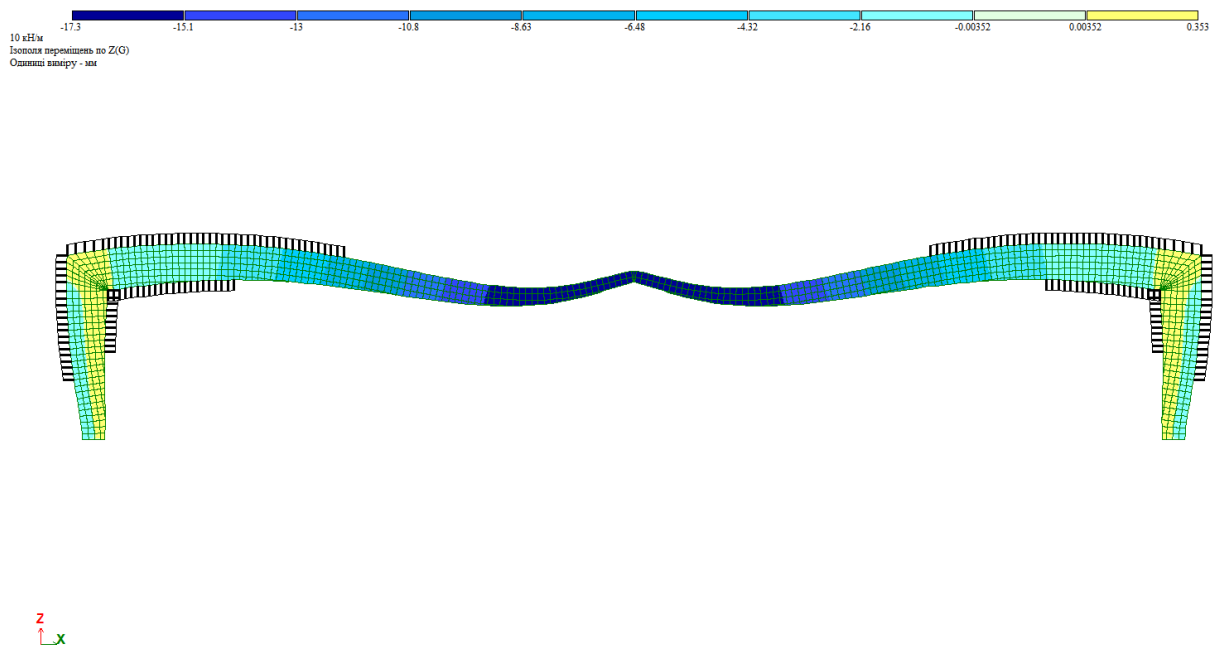


Рис. 2.37. Ізополя вертикальних деформацій рам з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 18 м, при рівномірному розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

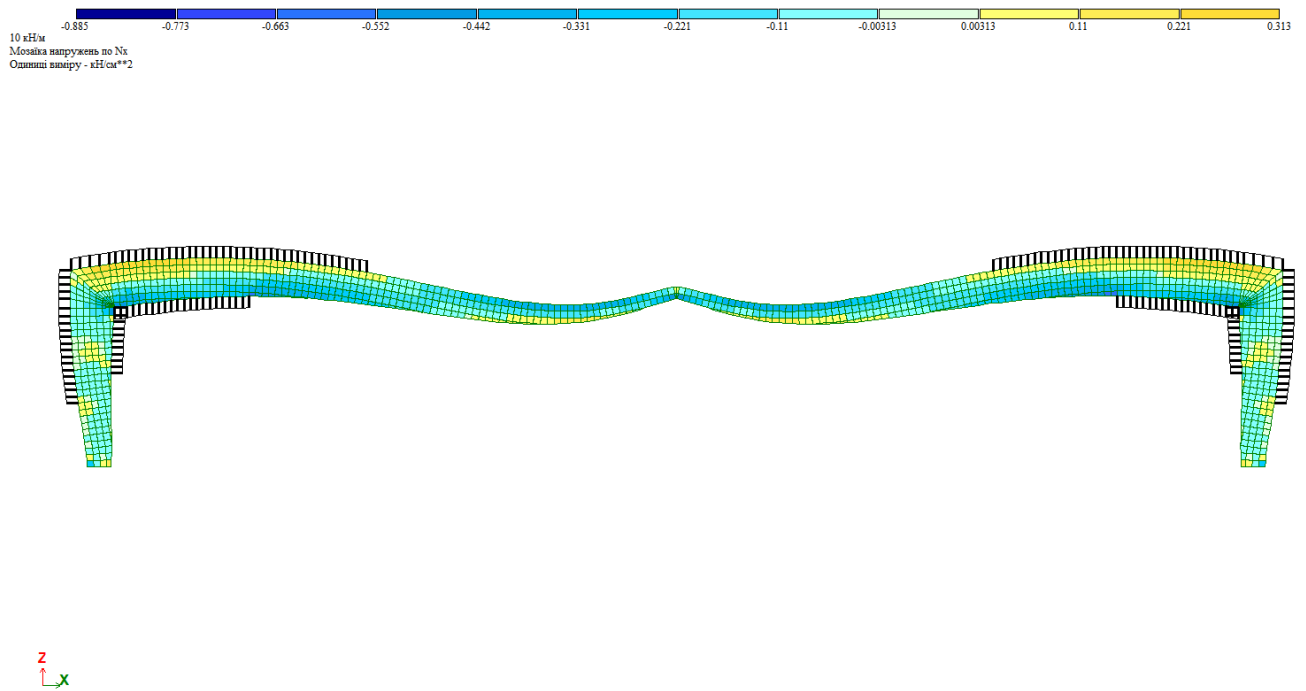


Рис. 2.38. Ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні в рамах з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 18 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

Для апробації результатів на досліджувані рами окрім прикладених рівномірно розподілених навантажень в 10 кН/м, ще прикладались рівномірно розподілені навантаження в 14 кН/м та 18 кН/м, а отримані результати для більш наглядного сприйняття зведені в табл. 2.5.

Табл. 2.5. Значення вертикальних деформацій та максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні для тришарнірних рам з клеєної деревини прольотом 18 м.

Тип рами	Навантаження, кН/м					
	10		14		18	
	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
Без підсилення	27,1	0,704	38,0	0,986	48,8	1,27
Підсилена композитною стрічкою	17,3	0,313	24,2	0,439	31,1	0,564
Відсоткова різниця	36%	58%	36%	55%	36%	56%

З отриманих результатів чисельних розрахунків рам з клеєної деревини прольотом 18 м бачимо, що наклеювання композитних стрічок на верхню та нижні грані карнизних вузлів дозволяє в середньому на 36% зменшити вертикальні деформації та на 56% зменшити нормальні максимальні напруження в розтягнутій зоні ригеля.

Також для досліджень обрано порівняння ламано-клеєної тришарнірної рами прольотом 24 м з клеєної деревини класу міцності *GL 36h* з модулем пружності вздовж волокон $E_{0,mean} = 14700$ МПа з цілісно клеєними карнизними вузлами з'єднання ригеля з стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута на та аналогічної рами з наклеюванням на верхню та нижню грані карнизних вузлів композитних стрічок *Sika CarboDur S1512* з модулем пружності вздовж волокон $E_{0,mean} = 170\ 000$ МПа.

В програмному комплексі ЛІРА-САПР змодельовали плоскими скінченними елементами СЕ №44 рами з клеєної деревини прольотом 24 м висотою 4,5 м

(рис. 2.39). Змінний поперечний переріз підібраний відповідно до п. 13.3 ДБН В.2.6-161:2017 [19], та має такі габарити:

- карнизний вузол $h_1 \times b = 1,2 \times 0,3$ м;
- гребеневий вузол $h_2 \times b = 0,24 \times 0,3$ м;
- опорний вузол $h_3 \times b = 0,48 \times 0,3$ м.

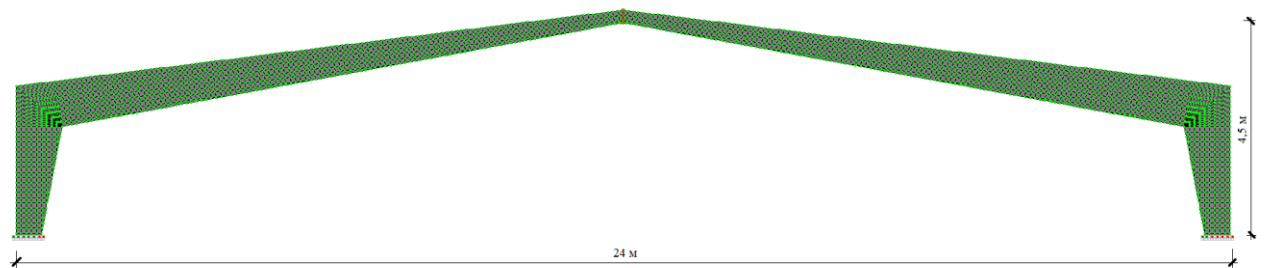


Рис. 2.39. Рами з клеєної деревини прольотом 24 м, висотою 4,5 м, без підсилення.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для ламано-клеєної тришарнірної рами прольотом 24 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.40) та максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні (рис. 2.41).

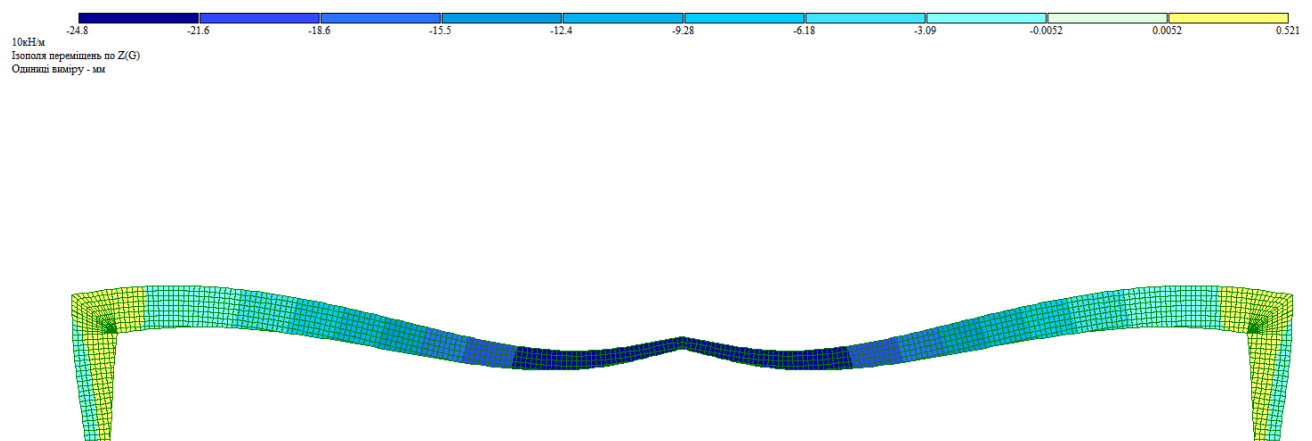


Рис. 2.40. Ізополя вертикальних деформацій рам з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 24 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

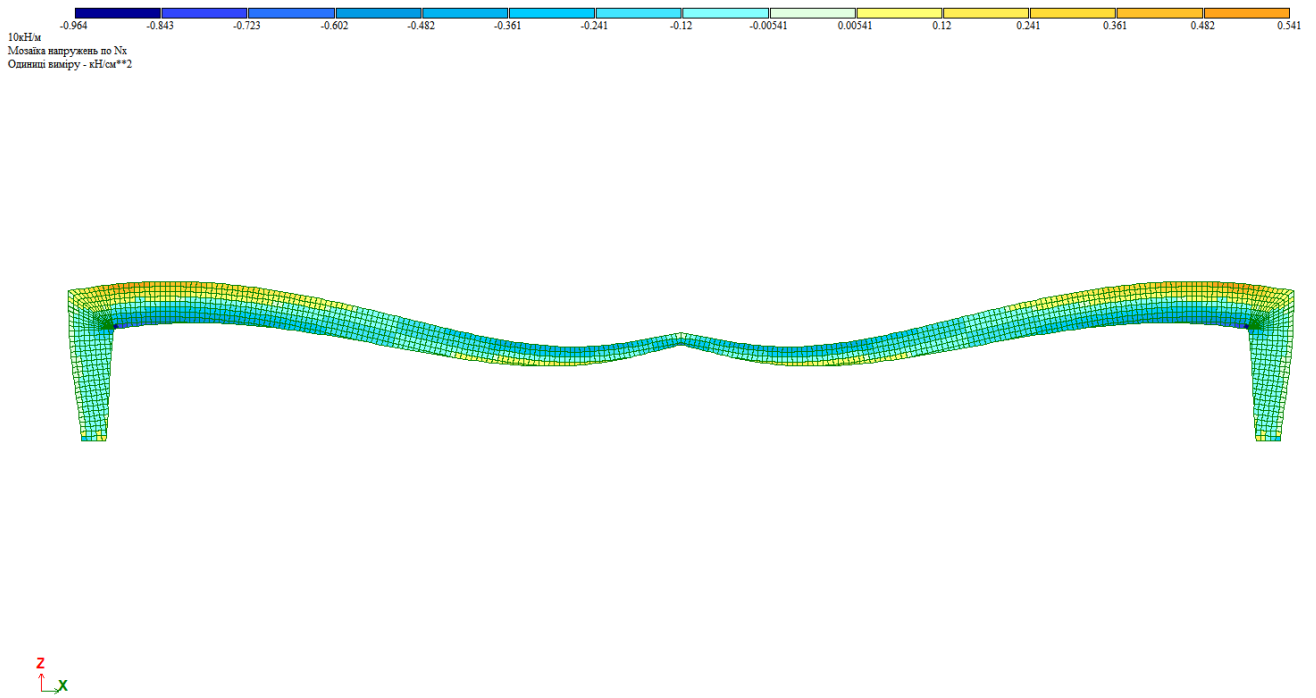


Рис. 2.41. Ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні в рамах з клеєної деревини без підсилення композитними стрічками прольотом 24 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

Аналогічно змодельовані рами з клеєної деревини підсилені композитними стрічками (рис. 2.42) які в свою чергу моделювались стержневими скінченними елементами СЕ №10.

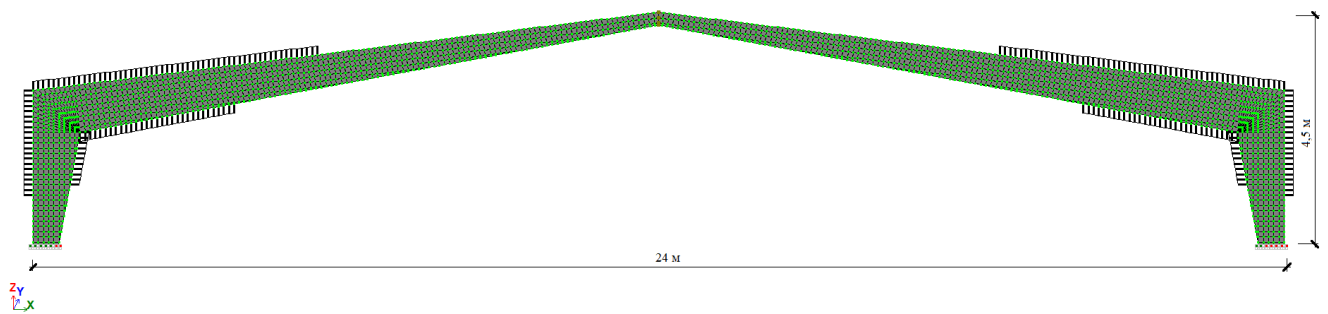


Рис. 2.42. Рами з клеєної деревини прольотом 24 м, висотою 4,5 м, підсилені композитних стрічок Sika CarboDur S1512.

За результатами розрахунку отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.43) та ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні (рис. 2.44) за аналогічного навантаженні рам з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 24 м.

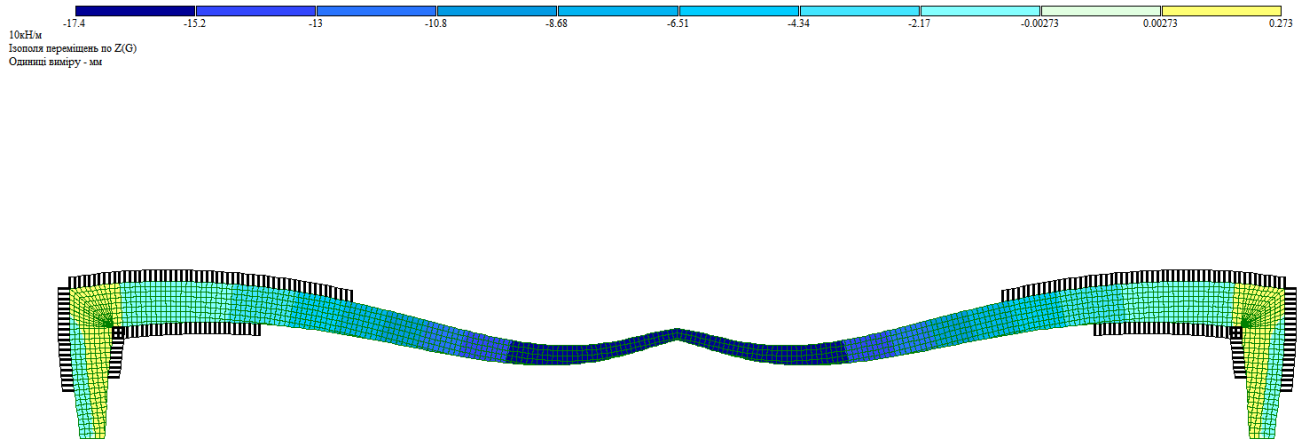


Рис. 2.43. Ізополя вертикальних деформацій рам з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 24 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

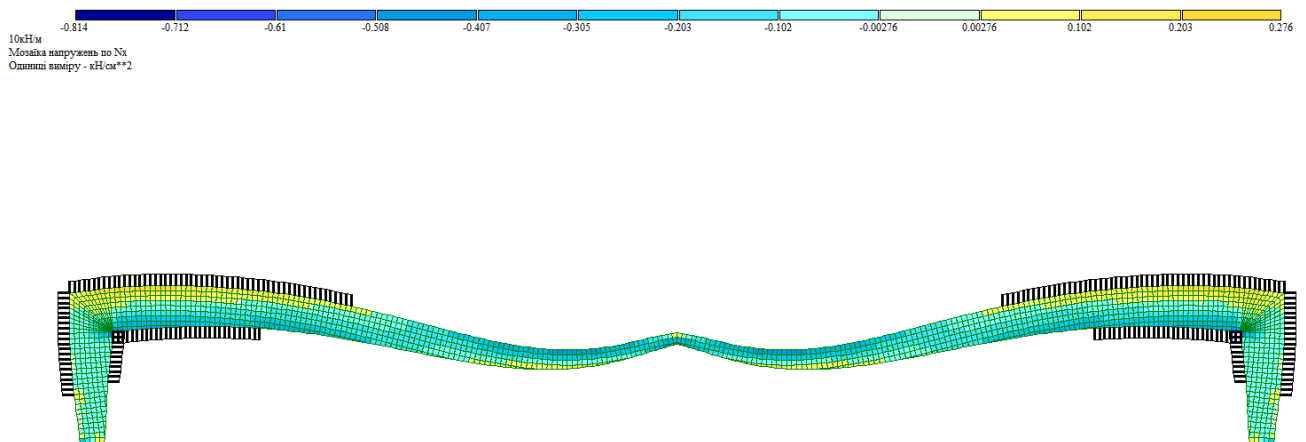


Рис. 2.44. Ізополя максимальних нормальних напружень в розтягнутій зоні в рамах з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками прольотом 24 м, при рівномірно розподіленому навантаженні в 10 кН/м.

Для апробації результатів на досліджувані рами окрім прикладених рівномірно розподілених навантажень в 10 кН/м, ще прикладались рівномірно розподілені навантаження в 14 кН/м та 18 кН/м, а отримані результати для більш наглядного сприйняття зведені в таблиці 2.6.

Табл. 2.6. Значення прогинів та максимальних нормальних напружень для тришарнірних рам з клеєної деревини прольотом 24 м.

Тип рами	Навантаження, кН/м					
	10		14		18	
	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
Без підсилення	24,8	0,541	34,6	0,757	44,6	0,974
Підсилена композитною стрічкою	17,4	0,276	24,3	0,386	31,3	0,497
Відсоткова різниця	30%	49%	30%	49%	30%	49%

З отриманих результатів чисельних розрахунків рам з клеєної деревини прольотом 24 м бачимо, що наклеювання композитних стрічок на верхню та нижні грані карнизних вузлів дозволяє в середньому на 30% зменшити вертикальні деформації та на 49% зменшити нормальні максимальні напруження в розтягнутій зоні ригеля.

Провівши аналіз напружено-деформованого стану шляхом моделювання в ПК ЛІРА САПР ламано-клеєних тришарнірні рам з клеєної деревини з цілісно клеєними карнизними вузлами та з'єднанням ригеля із стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута підсиленних композитними стрічками і порівнюючи з аналогічними рамами без підсилення можемо зробити висновки:

1. Підсилення карнизних вузлів в середньому зменшує вертикальні деформації в досліджуваних рамах на 39% та в середньому на 57% зменшує

максимальні нормальні напруження в розтягнутій зоні ригелів, що дозволяє зменшити витрати деревини на виготовлення карнизних вузлів таких рам.

2. Дані дослідження дозволяють розширити сферу застосування композитних стрічок як для нових рам так і для підсилення вже існуючих.

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

2.3. Аналіз напружено-деформованого стану плит з перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками.

Плити з перехресно-клеєної деревини (ПКД) або *CLT* (*Cross Laminated Timber*) - це масивний, багатошарово-склеєний будівельний матеріал з дерева. Для висотного будівництва споруд та будівель з деревини, використання плит з ПКД є основним методом влаштування перекриттів та покриття. Плита зазвичай виготовляється з одного матеріалу — дерева. Шари пиломатеріалу склеюються між собою під тиском, утворюючи фактично готову плиту. Шари дерев'яних ламелей укладаються перпендикулярно один одному, поперечно. 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. Але є вироби з тополі, а також різні комбінації, що включають різні породи дерева, в тому числі тверді. Звичайно, це позначається на ціні плит. Максимальний розмір таких плит — 18 м по довжині та 3,5 м по ширині. Кількість дошок зазвичай становить від 3-х до 7-ми шарів.

До недавнього часу було неможливо будувати багатоповерхові дерев'яні конструкції через відносну слабкість традиційних методів дерев'яного будівництва. Завдяки новому матеріалу з'явилася можливість будівництва будівель середньої поверховості. Оскільки плити є напівфабрикатами, то будівельний процес характеризується меншими затратами часу і кваліфікованої праці, а також меншою кількістю відходів.

Плити з перехресно-клеєної деревини - це універсальний матеріал, що використовується в якості великогабаритних елементів, стель і дахів, а також може бути використаний спільно з іншими будівельними матеріалами, такими як: бетон, цегла, сталь та скло.

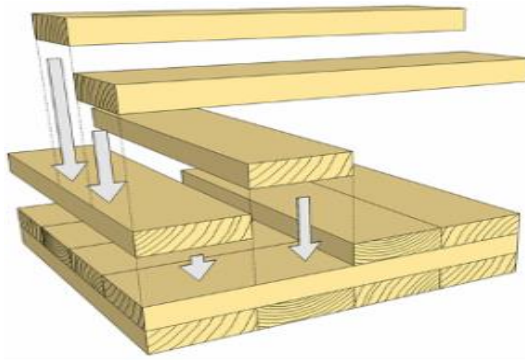


Рис. 2.45. Загальний вигляд ПКД – плити.

ПКД-плити мають ряд позитивних екологічних характеристик, спільних для всіх виробів з деревини: більш «м'який» вплив на навколишнє середовище, менша кількість викидів парникових газів при виробництві, менше утримання вуглецю в зв'язаному стані.

Провідними країнами-виробниками ПКД плит є: Австрія, Німеччина, Швейцарія, Швеція, Норвегія і Великобританія. Нові заводи незабаром будуть побудовані в Швеції, Австралії і в Північній Америці. Головні європейські виробники: KLN (Австрія); *Stora Enso* (Австрія); *Binderholz* (Австрія); *Martinsons* (Швеція); *Moelven* (Норвегія); *Thoma Holz GmbH* (Австрія); *FinnForest Merk* (Німеччина); *HMS* (Німеччина).

Вітчизняний досвід розрахунку *CLT* плит висвітлений в працях Бідакова А. М., Михайловського Д. В., Комара А. А., та інших [90 – 98].

Метою цієї роботи є дослідження напружено-деформованого стану плит з ПКД підсилених 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.

Об'єктом чисельних досліджень було обрано плити з ПКД прямокутних поперечних перерізів, склеєних з дошок одного класу міцності з підсиленням трьома композитними стрічками (рис. 2.46 (б)) та без нього (рис. 2.46 (а)) на двох шарнірних опорах, габаритами $B \times H = 1 \text{ м} \times 4 \text{ м}$, завантажених рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю 1 кН/м .

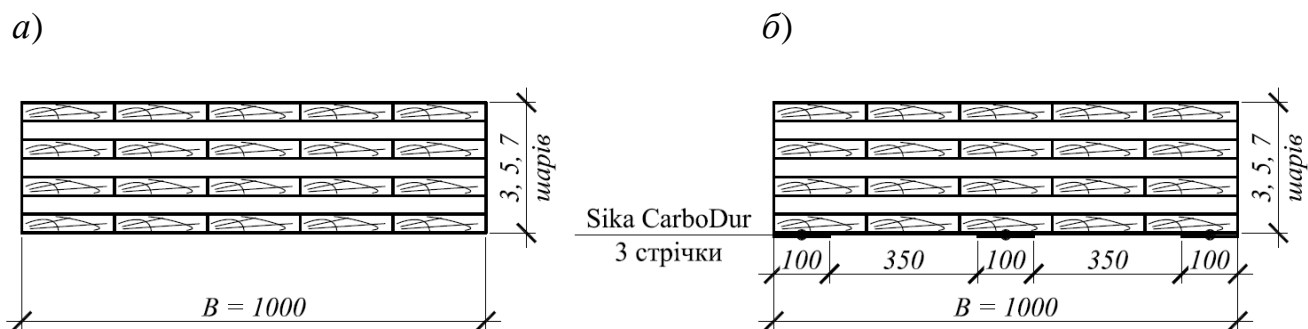


Рис. 2.46. Геометрична схема поперечного перерізу плит з перехресно-клеєної деревини: а - без підсилення; б – підсилена трьома композитними стрічками.

Також об'єктом чисельних досліджень було обрано плити з ПКД прямокутних поперечних перерізів, склеєних з дошок одного класу міцності з підсиленням п'ятьма композитними стрічками (рис. 2.47 (б)) та без нього (рис. 2.47 (а)) на двох шарнірних опорах, габаритами $B \times H = 1 \times 4$ м, завантажених рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю 1 кН/м.

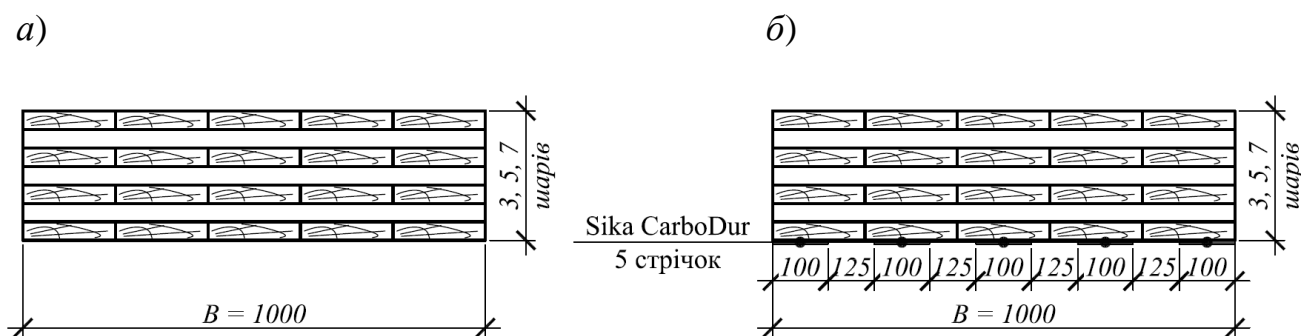


Рис. 2.47. Геометрична схема поперечного перерізу плит з перехресно-клеєної деревини: а - без підсилення; б – підсилена п'ятьма композитними стрічками.

Поперечний переріз плити складається з трьох, п'яти та семи шарів дошок деревини одного класу міцності С24, товщиною $t = 2$ см, які для чисельних досліджень, моделювались об'ємними скінченними 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 поперечних перерізів плит які з модельовано СЕ №36:

- для поздовжніх шарів дошок:
 - модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,\text{mean}} = 11000$ МПа;
 - модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,\text{mean}} = 370$ МПа;
 - модуль зсуву $G = G_{\text{mean}} = 690$ МПа;
- для поперечних шарів дошок:
 - модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,\text{mean}} = 370$ МПа;
 - модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,\text{mean}} = 11000$ МПа;
 - модуль зсуву $G = G_{\text{mean}} = 690$ МПа.

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 $E_1 = E_{0,\text{mean}} = 170\,000$ МПа.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД без підсилення композитними стрічками при обраних габаритах та висотою поперечного перерізу що складається з трьох шарів дошок ($H_1 = 6$ см), при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.48) та ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.49).

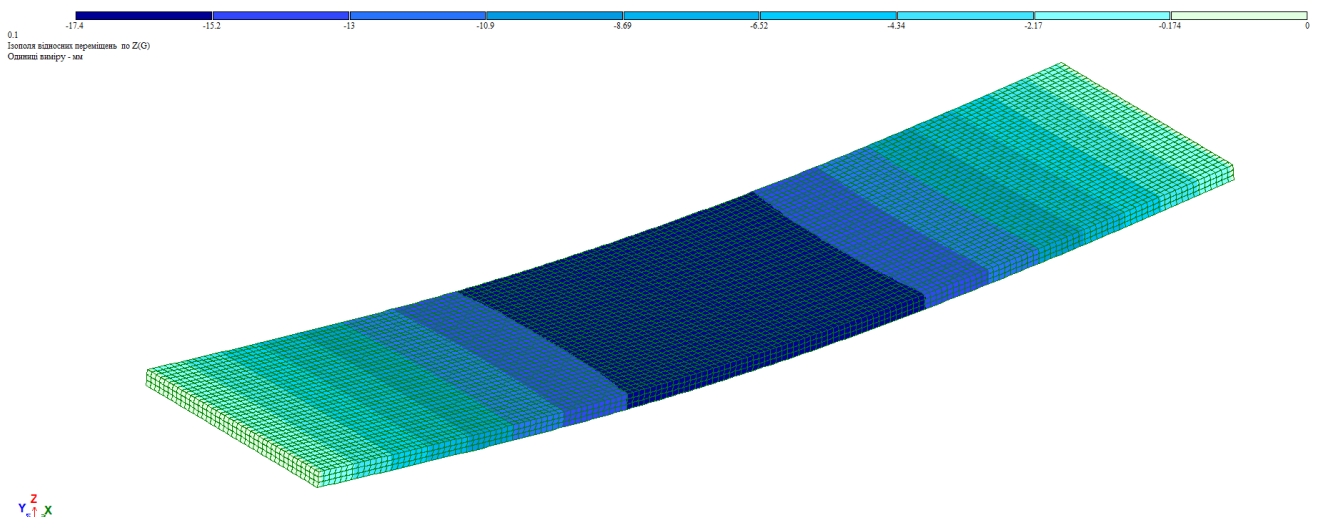


Рис. 2.48. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного

перерізу що складається з трьох шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

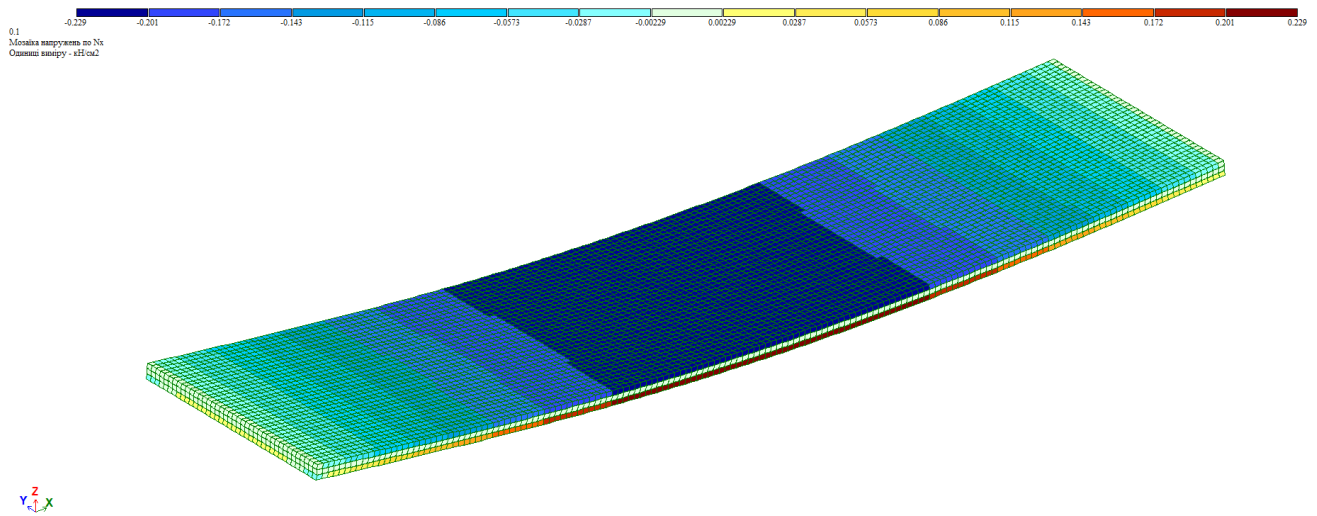


Рис. 2.49. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу що складається з трьох шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Відповідні ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.50) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.51) при аналогічному навантаженні плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками.

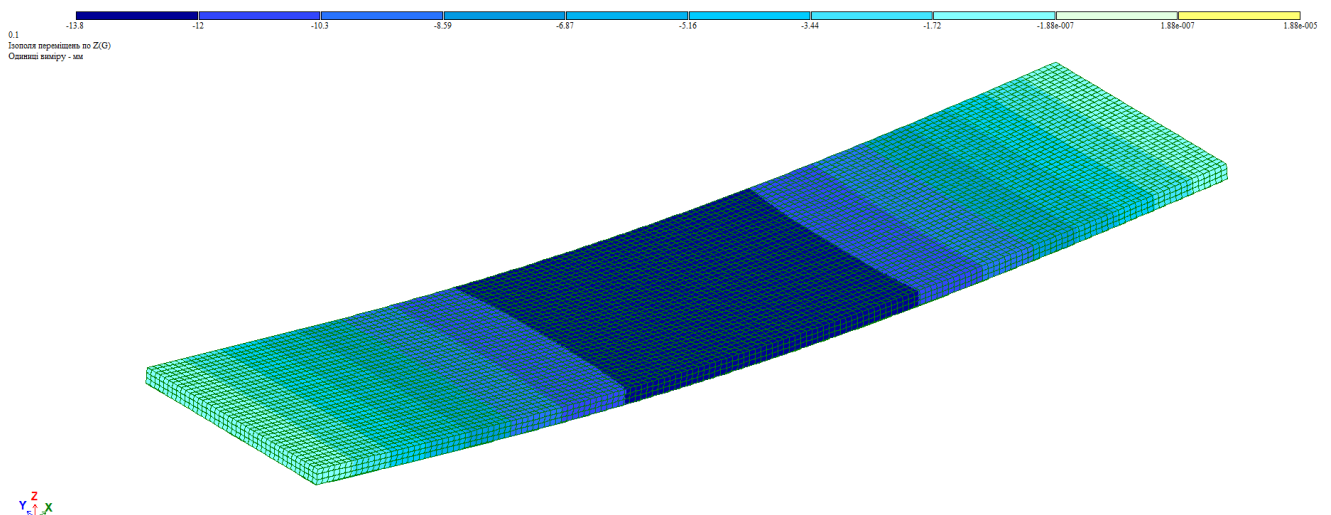


Рис. 2.50. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

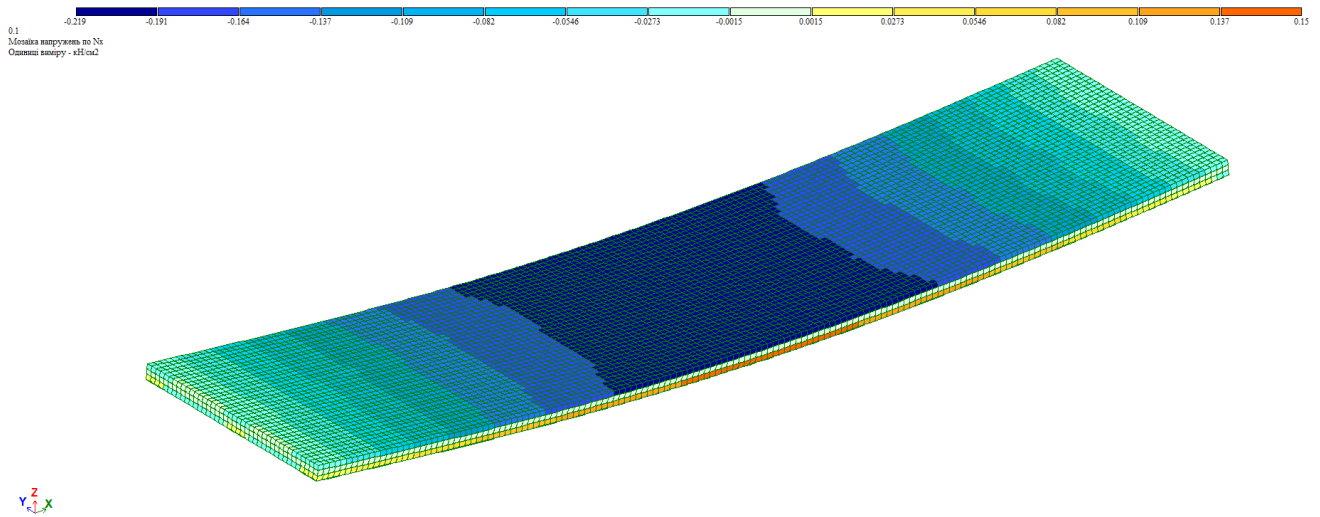


Рис. 2.51. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилені композитними стрічками та без підсилення висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.7.

Табл. 2.7. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для плит з ПКД підсилені композитними стрічками та без підсилення, висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

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 ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.52) та ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.53) при аналогічному навантаженні на плити з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками.

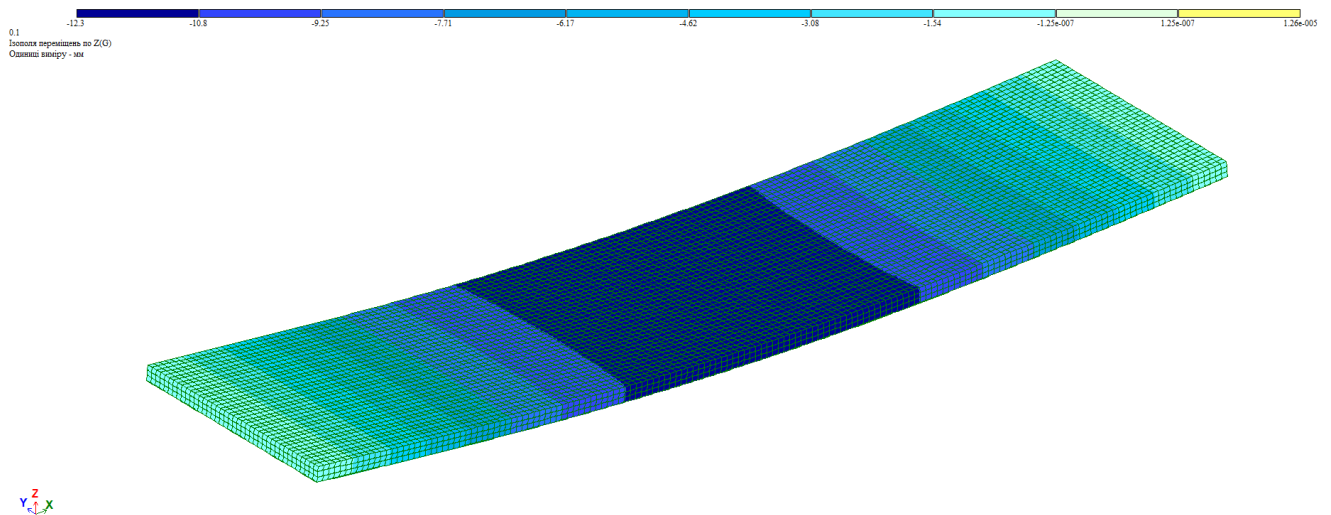


Рис. 2.50. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

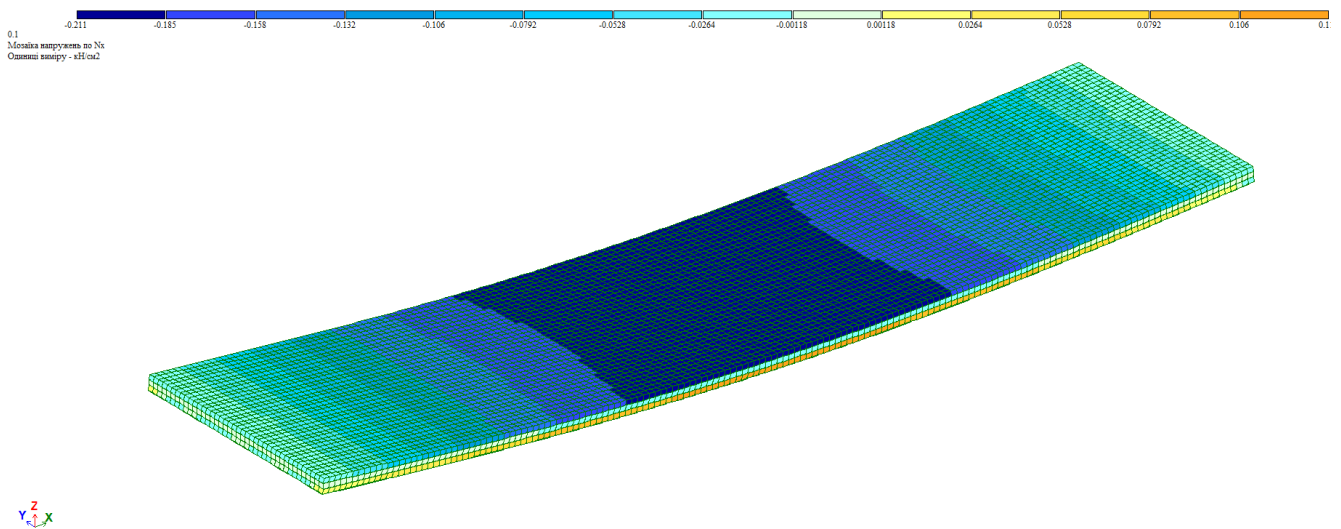


Рис. 2.51. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилених композитними стрічками та без підсилення, висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.8.

Табл. 2.8. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для плит з ПКД з підсиленням та без підсилення композитними стрічками висотою поперечного перерізу, що складається з трьох шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

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 трьох шарів дошок ($H_1 = 6$ см) з підсиленням трьома 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 вертикальні деформації таких плит при армуванні трьома стрічками зменшується більш ніж на 20%. Відповідно для досліджуваних плит підсилених п'ятьма композитними стрічками при аналогічному рівномірному навантаженні міцність на розтяг збільшується більш ніж на 48%, а вертикальні деформації таких плит зменшились більш ніж на 29% відносно не підсилених.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД без підсилення композитними стрічками при обраних габаритах та висотою поперечного перерізу що складається з п'яти шарів дошок ($H_2 = 10$ см), при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м, ізополя вертикальних деформацій наведено на рис. 2.52, а ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини на рис. 2.53.

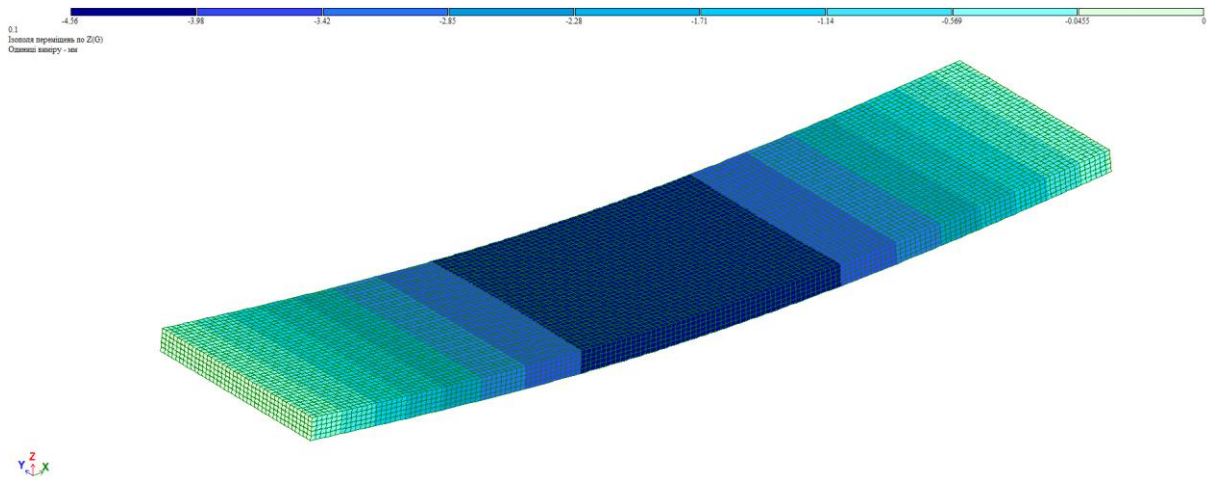


Рис. 2.52. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

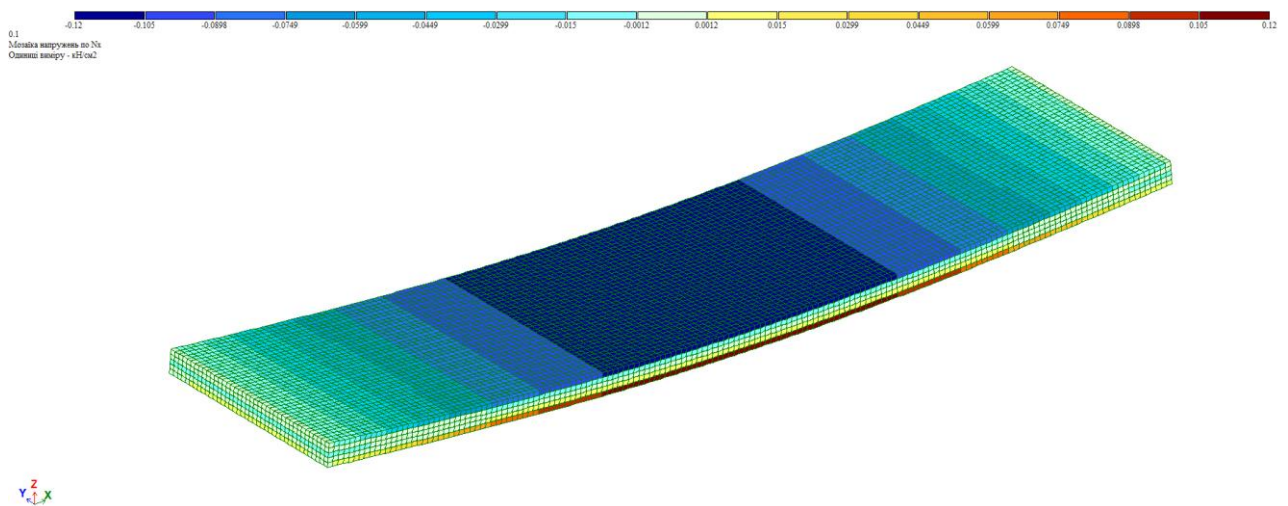


Рис. 2.53. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Ізополя вертикальних деформацій наведено на рис. 2.54, ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини на рис. 2.55 при аналогічному навантаженні на плити з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками.

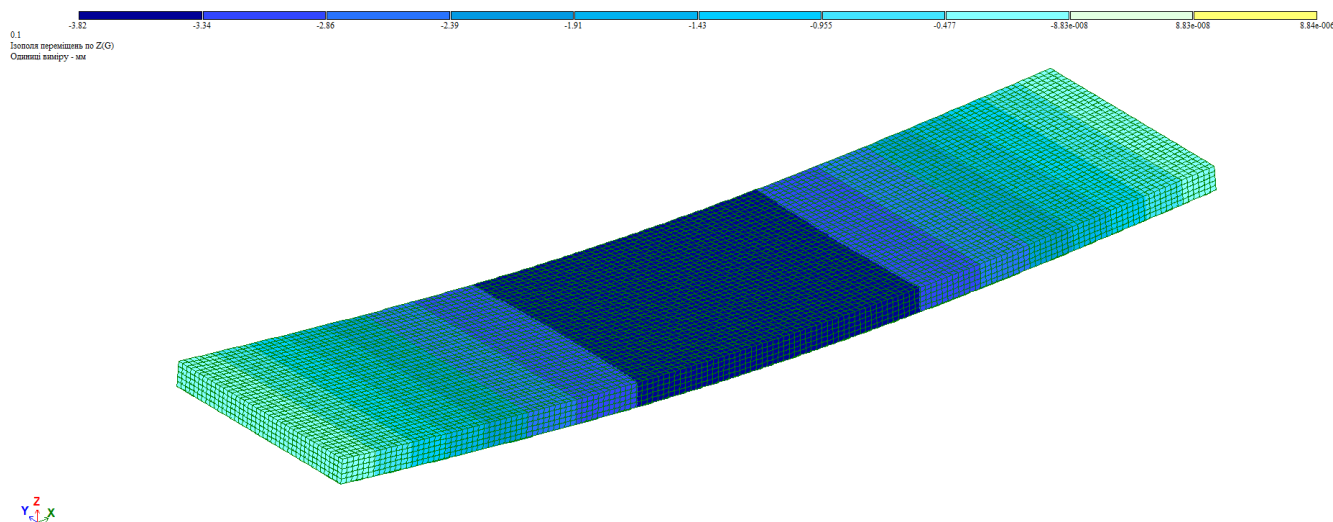


Рис. 2.54. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок при рівномірному розподіленім навантаженням в 1 кН/м.

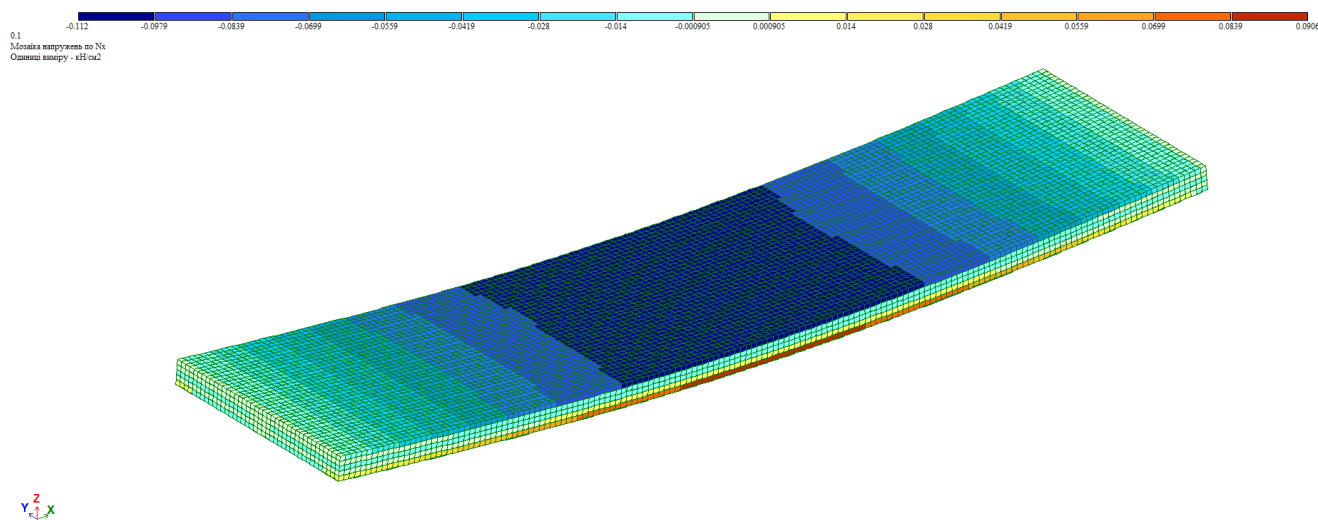


Рис. 2.55. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилених композитними стрічками та без підсилення висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок ($H_2 = 10$ см), при рівномірно розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.9.

Табл. 2.9. 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 п'яти шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Товщина плити		П'ять шарів дошок ($H_2 = 10$ 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	4,56	0,12
МСЕ з об'ємними СЕ №36	підсилена трьома композитними стрічками	3,82	0,091
Відсоткова різниця		16%	24%

Ізополя вертикальних деформацій наведено на рис. 2.56, ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини на рис. 2.57 при аналогічному навантаженні на плити з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками.

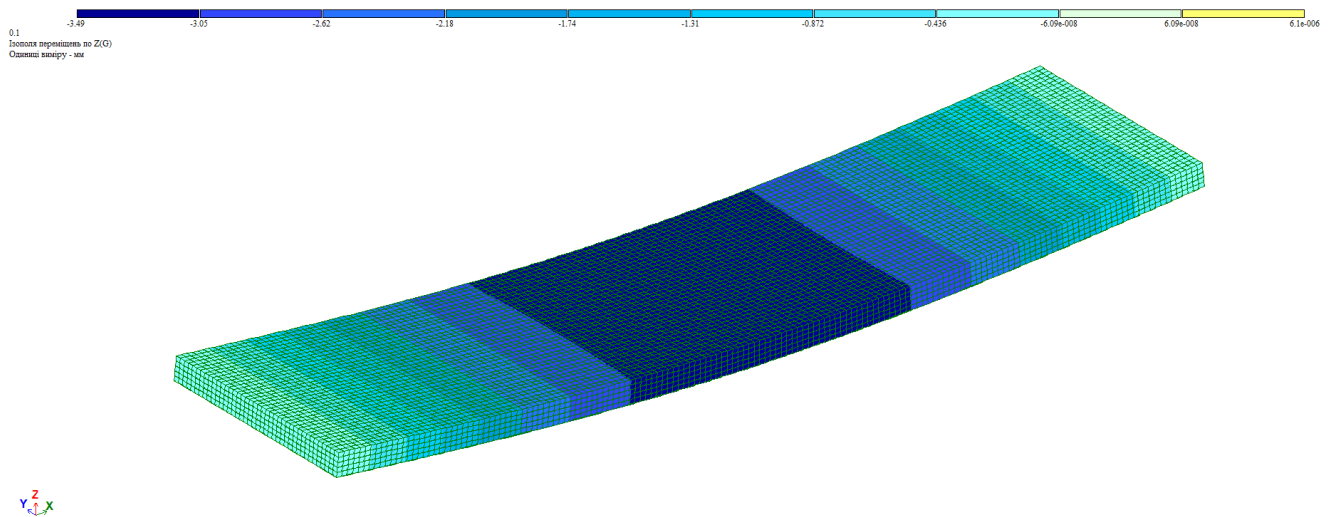


Рис. 2.56. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

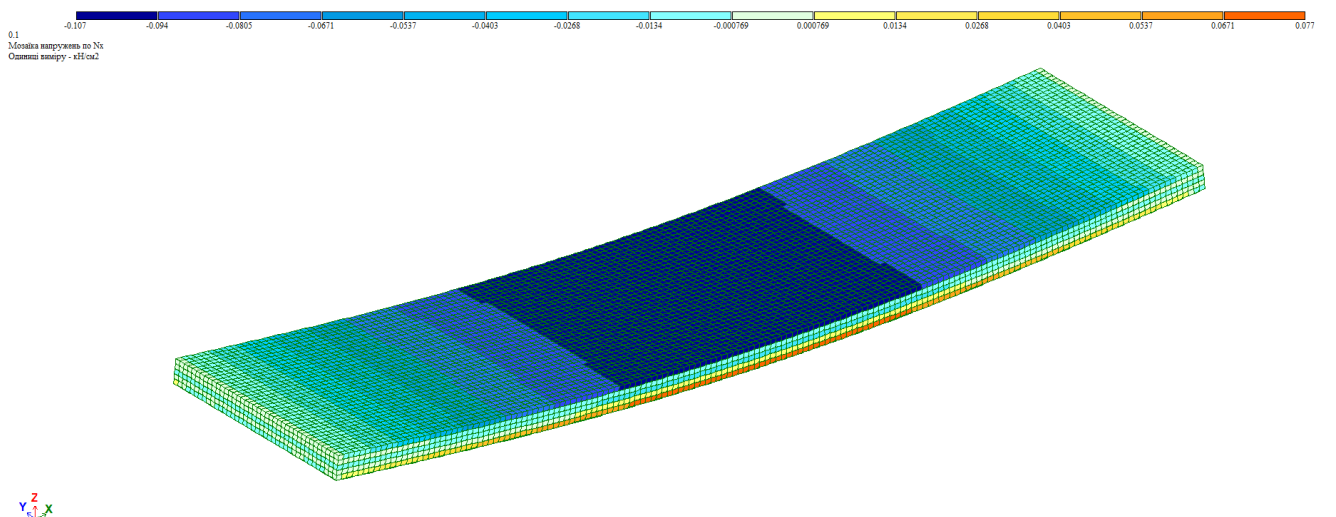


Рис. 2.57. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилені композитними стрічками та без підсилення висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок, при рівномірному розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.10.

Табл. 2.10. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для плит з ПКД з підсиленням та без підсилення композитними стрічками висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Товщина плити		П'ять шарів дошок ($H_2 = 10$ 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	4,56	0,12
МСЕ з об'ємними СЕ №36	підсилена п'ятьма композитними стрічками	3,49	0,077
Відсоткова різниця		23%	35%

З проведених чисельних досліджень зрозуміло, що для досліджуваних плит з клеєної деревини одного класу міцності, висотою поперечного перерізу, що складається з п'яти шарів дошок ($H_2 = 10$ см), з підсиленням трьома композитними стрічками, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується більш ніж на 24%, ніж аналогічні плити без підсилення композитними стрічками. А вертикальні деформації таких плит при армуванні трьома стрічками зменшується більш ніж на 16%. Відповідно для досліджуваних плит підслених п'ятьма композитними стрічками при аналогічному навантаженні міцність на розтяг збільшується більш ніж на 35%, а вертикальні деформації таких плит зменшились більш ніж на 23% відносно не підслених.

За результатами чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД без підсиленням композитними стрічками при обраних габаритах та висотою поперечного перерізу що складається з семи шарів дошок ($H_3 = 14$ см), при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м, отримали ізополя вертикальних деформацій (рис. 2.58) та максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини (рис. 2.59).

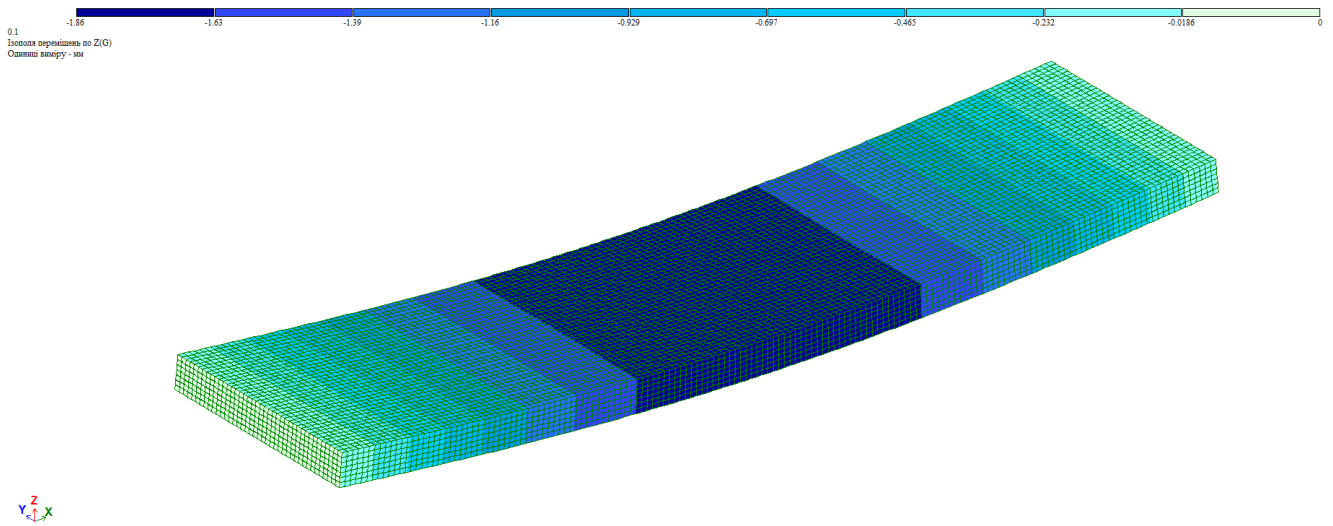


Рис. 2.58. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

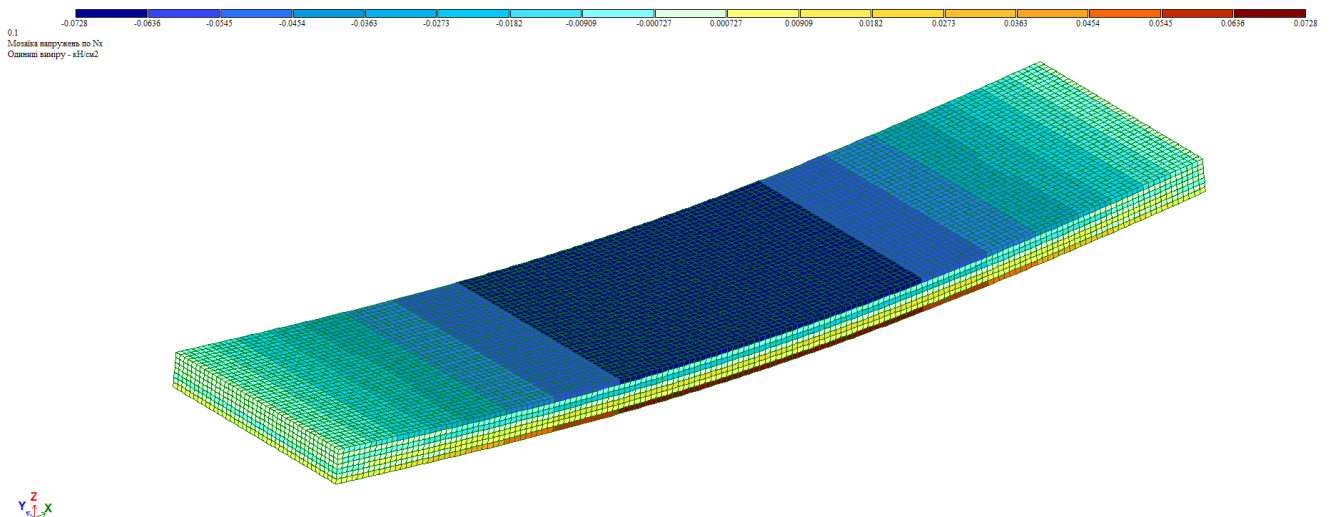


Рис. 2.59. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД без підсилення композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Відповідні ізополя вертикальних деформацій наведено на рис. 2.60, а ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини на рис. 2.61 при аналогічному навантаженні на плити з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками.

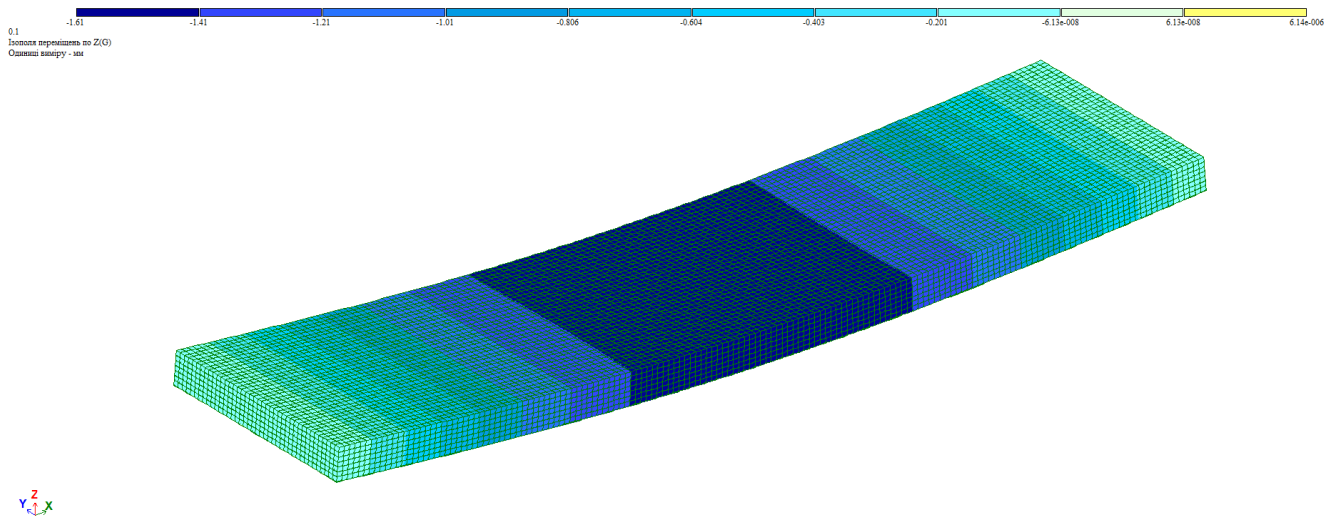


Рис. 2.60. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

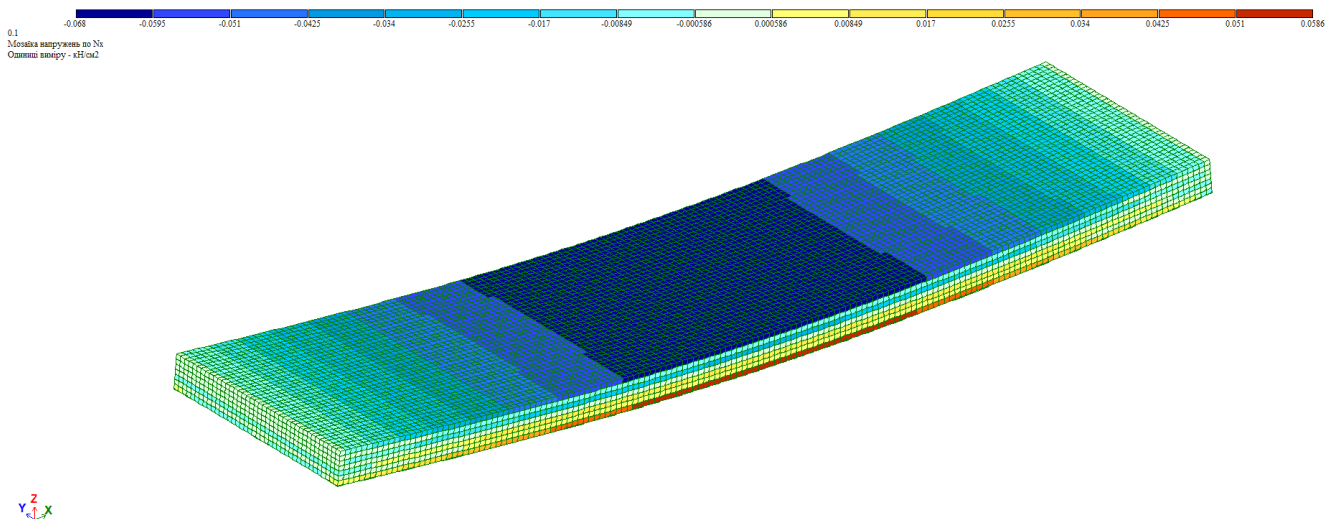


Рис. 2.61. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням трьома композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок при рівномірному розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилені композитними стрічками та без підсилення висотою поперечного перерізу що складається з семи шарів дошок ($H_3 = 14$ см), при рівномірному розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.11.

Табл. 2.11. 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 семи шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Товщина плити		Сім шарів дошок ($H_3 = 14$ 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	2,86	0,072
МСЕ з об'ємними СЕ №36	підсилена трьома композитними стрічками	1,61	0,058
Відсоткова різниця		13%	19%

Ізополя вертикальних деформацій наведено на рис. 2.62, а ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини на рис. 2.63 за аналогічного навантаження на плити з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками.

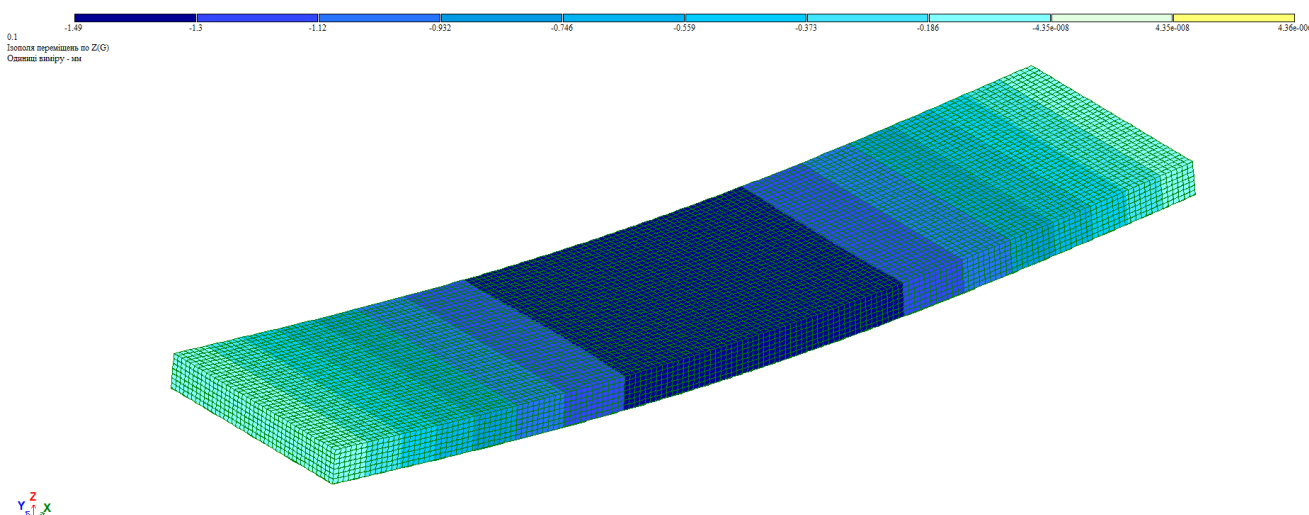


Рис. 2.62. Ізополя вертикальних деформацій плит з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

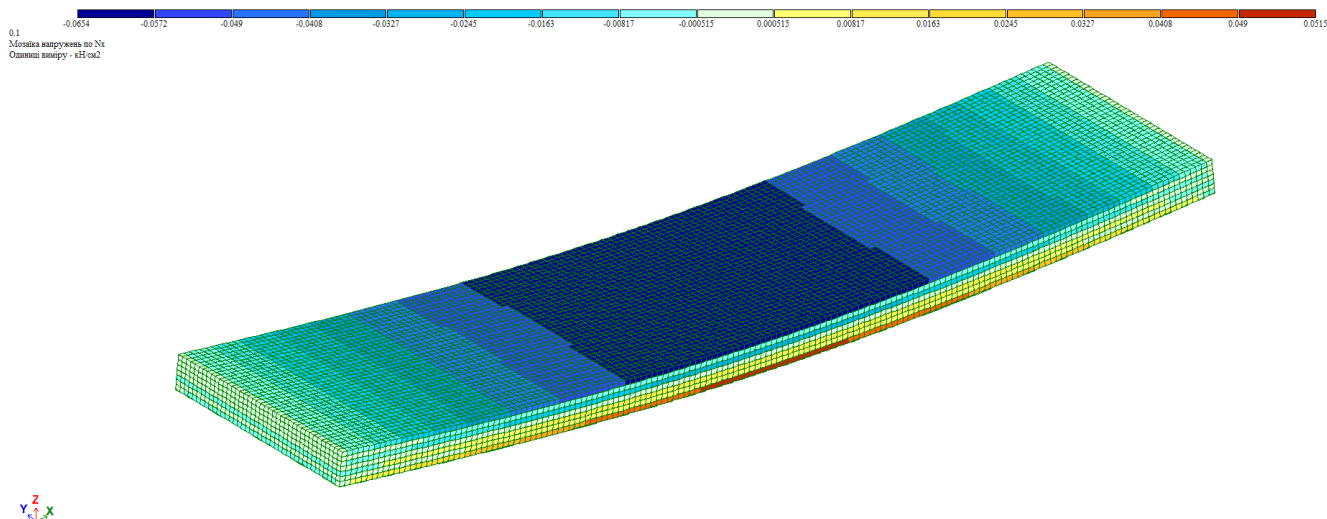


Рис. 2.63. Ізополя максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД з підсиленням п'ятьма композитними стрічками габаритами $B \times L = 1 \times 4$ м та висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Повні результати чисельних досліджень МСЕ для плит з ПКД підсилених композитними стрічками та без підсилення висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні 1 кН/м представлено в табл. 2.12.

Табл. 2.12. Значення вертикальних деформацій w , та максимальних нормальних напружень $\sigma_{m,d}$ для плит з ПКД з підсиленням та без підсилення композитними стрічками висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1 кН/м.

Товщина плити		Сім шарів дошок ($H_3 = 14$ 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 підсиленням	1,86	0,072
МСЕ з об'ємними СЕ №36	підсилена п'ятьма композитними стрічками	1,49	0,051
Відсоткова різниця		19%	29%

З проведених чисельних досліджень зрозуміло, що для досліджуваних плит з клеєної деревини одного класу міцності, висотою поперечного перерізу, що складається з семи шарів дошок ($H_3 = 14$ см), з підсиленням трьома композитними стрічками, при рівномірно розподіленому навантаженні в 1,0 кН/м, міцність на розтяг збільшується більш ніж на 19%, ніж аналогічні балки без підсилення композитними стрічками. А вертикальні деформації таких плит при армуванні трьома стрічками зменшуються більш ніж на 13%. Відповідно для досліджуваних плит підсилених п'ятьма композитними стрічками при аналогічному рівномірному навантаженні міцність на розтяг збільшується більш ніж на 29%, а вертикальні деформації таких плит зменшилися більш ніж на 19% відносно не підсилених.

Більш детально розглянемо відсоткове відношення впливу підсилення на плити з ПКД за допомогою діаграм порівняння, де наведені відсотки зменшення вертикальних деформацій після підсилення трьома та п'ятьма композитними стрічками (рис. 2.64) та відсоткове зменшення максимальних нормальних напружень вздовж волокон деревини плит з ПКД після підсилення трьома та п'ятьма композитними стрічками (рис. 2.65).

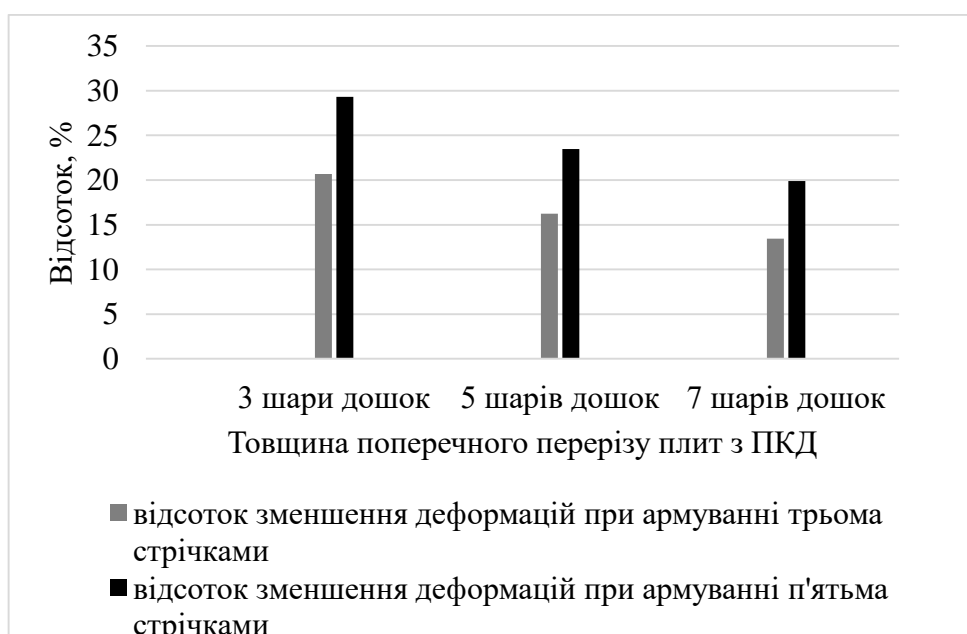


Рис. 2.64. Діаграма відсоткового зменшення вертикальних деформацій після підсилення трьома та п'ятьма композитними стрічками плит з ПКД різної товщини поперечного перерізу.

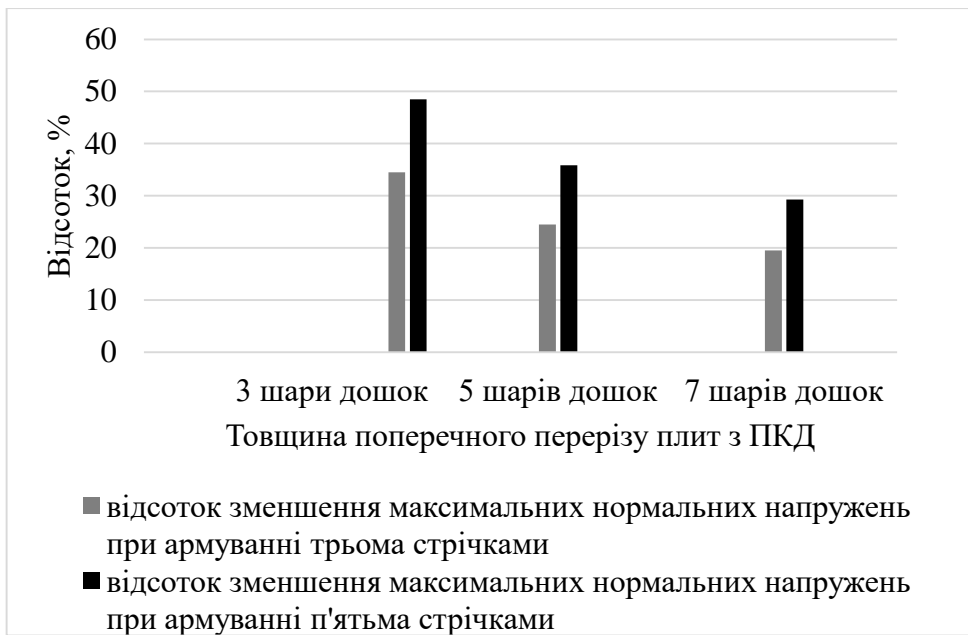


Рис. 2.65. Діаграма відсоткового зменшення максимальних нормальних напружень вздовж волокон після підсилення трьома та п'ятьма композитними стрічками плит з ПКД різної товщини поперечного перерізу.

З наведених графіків зменшення вертикальних деформацій та максимальних нормальних напружень вздовж волокон після підсилення трьома та п'яти 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 трьома композитними стрічками, та від майже 30% до менш ніж 25% при армуванні п'ятьма композитними стрічками. Щодо зменшення максимальних нормальних напружень вздовж волокон після підсилення, то підсилення трьома стрічками композитних стрічок зменшує від 35% до майже 20%, а підсилення п'ятьма композитними стрічками зменшує максимальні нормальні напруження від майже 50% до майже 30%. Можемо зробити висновок, що 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.

Як видно з одержаних результатів за розрахунком МСЕ в ПК ЛІРА-САПР плити з ПКД склеєні з дошок класу міцності С 24, що моделювались об'ємними

скінченними елементами СЕ №36 підсилені композитними стрічка з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012*, що моделювались об'ємними скінченними елементами СЕ №36 мають в середньому на 20% менші вертикальні деформації та на 32% менші нормальні напруження від аналогічних плит з ПКД не підсилені композитними стрічками.

2.4. Висновки по розділу 2.

Після проведення аналізу числовими методами досліджень напружено-деформованого стану конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками можна зробити такі висновки:

1. За розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР балки з склеєних дошок класу міцності *C35*, що моделювались об'ємними скінченними елементами *CE №36* підсилені композитними стрічка з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012*, що моделювались плоскими скінченними елементами *CE №44* мають в середньому на 18% менші вертикальні деформації та на 27% менші нормальні напруження від аналогічних балок з клеєної деревини не підсилених композитними стрічками.

2. За розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР ламано-клеєних тришарнірних рам з клеєної деревини класу міцності *GL 36h* з цілісно клеєними карнизними вузлами з з'єднанням ригеля із стійкою через зубчасті шипи по бісектрисі кута, що моделювались плоскими скінченними елементами *CE №44* та підсилені композитними стрічка з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S 1012*, що моделювались стержневими скінченними елементами *CE №10*, в середньому зменшують вертикальні деформації в досліджуваних рамах на 39% та в середньому на 57% максимальні нормальні напруження в розтягнутій зоні ригелів.

3. За розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР плити з ПКД склеєні з дошок класу міцності *C 24*, що моделювались об'ємними скінченними елементами *CE №36* підсилені композитними стрічка з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012*, що моделювались плоскими скінченними елементами *CE №36* мають в середньому на 20% менші вертикальні деформації та на 32% менші нормальні напруження від аналогічних плит з ПКД не підсилених композитними стрічками.

4. У зв'язку з відсутністю в вітчизняних нормативних документах [18-19] вказівок щодо розрахунку чи будь якого іншого інженерного підходу до

конструкцій з клеєної деревини, підсилених композитними стрічками є актуальною подальша перспектива даних досліджень.

5. Окремого вивчення потребує підбір універсального методу моделювання конструкцій з клеєної та перехресно-клеєної деревини в програмних комплексах.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКИ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНОЇ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ

Експериментальне дослідження полягає у дослідженні впливу підсилення композитними стрічками наклеєними на розтягнуту зону балки з клеєної деревини шляхом порівняння напружено-деформованого стану клеєної балки без підсилення при різних значеннях поперечних навантажень та аналогічних досліджень з цією ж балкою з підсиленням. В роботі застосовано експериментальне дослідження моделі – це різновид механічного моделювання. В такому випадку для перевірки і уточнення теорії розрахунку розміри експериментального об'єкта, в принципі, можуть бути будь-якими, якщо це не суперечить теоретичним передумовам розрахунку натурних конструкцій.

Об'єктом експериментального дослідження є балка з клеєної деревини без підсилення та підсилена композитними стрічками *Sika CarboDur S512* наклеєними одна поряд з іншою на нижню розтягнуту зону балки по всій ширині. Поперечний переріз балки $b \times h = 10 \times 24$ см, складається з 8 соснових дошок, товщиною $t = 3$ см, довжина балки $L = 400$ см, робочий прольот балки $L_p = 375$ см.

Для виготовлення досліджуваної балки використовувалась деревина сосни 3 сорту, вирощена в Рівненській області України. Загальний вигляд досліджуваної балки та схема початкових дефектів деревини наведені на рис. 3.1. Початкові дефекти варто враховувати для подальшого аналізу руйнування досліджуваного зразка.

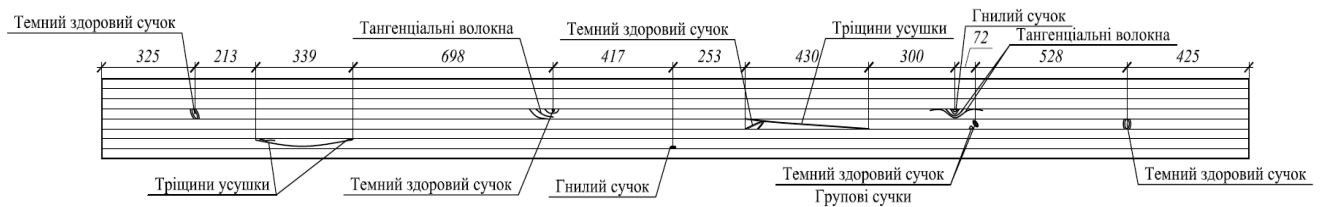


Рис. 3.1. Загальний вигляд та розташування початкових дефектів досліджуваного зразка.

Зроблені розрахунки напруженого стану перерізів по осі опори, по осі дії навантаження (визначені напруження вздовж волокон σ_o , впоперек волокон σ_{90} та сколюючі τ) та в середині прольоту (визначені напруження вздовж волокон σ_o) за методикою чинного ДБН В.2.6-161:2017 [19], показники тензOMETричних пристроїв за результатами проведення експериментальних випробувань наведені в додатку В.

3.1. Визначення механічних властивостей деревини яка використовувалась при виготовленні експериментальних клеєних балок.

Для виготовлення досліджуваної балки використовувалась деревина сосни 3 сорту, вирощена в Рівненській області України. З партії було відібрано 4 зразки (рис. 3.2) поперечним перерізом $b \times h = 2,5 \times 2,5$ см, повна довжина зразка $l = 50$ см, для визначення модуля пружності та характеристичного значення міцності деревини при згині вздовж волокон відповідно до [99].



Рис. 3.2. Дерев'яні зразки для визначення механічних властивостей.

Перед визначенням механічних характеристик окремо визначались фізичні властивості деревини, а саме: вологість за допомогою вологоміра *Testo 606-2* (рис. 3.3) та густина зразків які занесені до таблиці 3.1.



Рис. 3.3. Визначення вологості деревини вологоміром *Testo 606-2*.

Табл. 3.1. Геометричні параметри та фізичні властивості зразків деревини для експериментального визначення механічних властивостей.

Найменування зразка	Поперечний переріз $b \times h$, см	Довжин, см	Маса, кг	Густина, кг/м ³	Вологість, %
Сосна 1	2,5 x 2,5	50	0,145	464	9,8
Сосна 2			0,155	496	9,7
Сосна 3			0,165	528	9,2
Сосна 4			0,160	512	8,9

Модуль пружності вздовж волокон та характеристичне значення міцності визначались для зразків на двох шарнірних опорах прольотом 45 см, які були симетрично навантажені зосередженими силами у двох точках (рис. 3.4). Між зразком, що досліджувався і головками через які прикладались навантаження та опорами, для уникнення локального зминання деревини, були вставлені маленькі сталеві пластини довжиною не більше ніж половина висоти випробувального зразка.

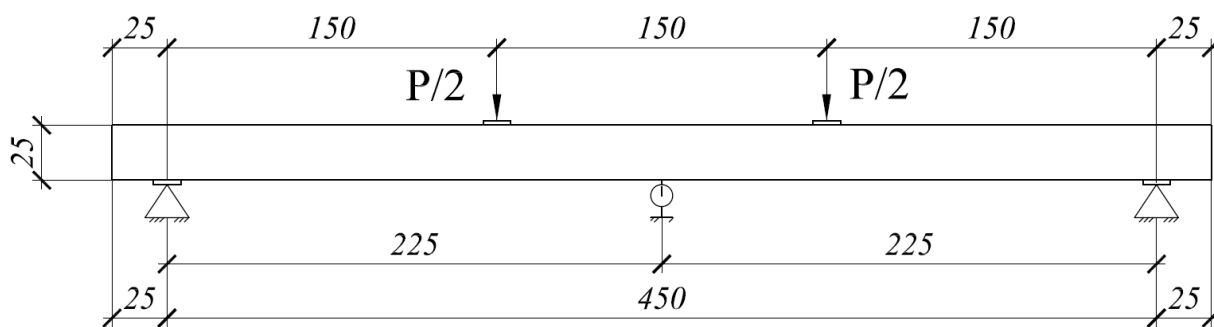


Рис. 3.4. Схема експериментальної установки для визначення механічних властивостей деревини.

Для реалізації експериментальних випробувань з визначення механічних властивостей деревини зразків на базі Випробувального центру будівельних конструкцій (ВЦБК) КНУБА розроблено “Дослідний стенд для проведення випробувань експериментальних дослідних зразків” (рис. 3.5). Цей стенд застосовано для випробувань експериментальних дослідних зразків деревини. Було

виконано випробування дерев'яних зразків з метою визначення модуля пружності та характеристичних значень міцності за схемою чистого згину.



Рис. 3.5. Дослідний стенд для проведення експериментальних випробувань дослідних зразків для визначення модуля пружності деревини при згині.

Для визначення модуля пружності деревини випробувальних зразків через розподільчу траверсу до них прикладалось навантаження, яке не пошкоджувало зразок. Навантаження передавалось через гідравлічний прес та вимірювалось за допомогою динамометру ДОС-3-0,2. Вертикальні деформації зразків вимірювались індикатором годинникового типу (ІГТ).

Теоретичні значення для розрахунку максимальних навантажень приймалися, як для цільної деревини хвойних порід класу міцності С 30 відповідно до [19]. Максимальний прогин для визначення загального модулю пружності відповідно до схеми прикладання навантаження розраховувався за формулою:

$$\frac{11P_e}{32E_{0,mean}b} \left(\frac{L}{h} \right)^3; \quad (3.1)$$

де: P_e – зосереджене навантаження на $\frac{1}{4}$ і $\frac{3}{4}$ прольоту шарнірно опертої балки; $E_{0,mean}$ – середній модуль пружності для матеріалу вздовж волокон; b – ширина елемента, мм; h – висота елемента, мм; L – розрахунковий проліт.

Кожне випробування розбивалось на певну кількість послідовних навантажень з кроком 0,1 кН. Прикладання кожного кроку навантаження супроводжувалось наступними етапами:

- навантаження зразка;
- зразок витримувався під навантаженням;
- знімались показники індикатора годинникового типу;
- відбувався наступний крок навантаження із повторенням вище наведених етапів.

Після фіксації на ІГТ значення яке досягало максимальних прогинів відповідно до теоретичного розрахунку, зразок розвантажувався при цьому значення на індикаторі поверталось в нульову позицію, тоді індикатор та динамометр ДОС-3-0,2 знімались та встановлювався динамометр ДОС-3-3, а зразок довантажувався для визначення характеристичних значень міцності деревини на згин шляхом руйнування зразка (рис. 3.6) відповідно до [99].



Рис. 3.6. Дослідний стенд для проведення випробувань експериментальних дослідних зразків для визначення характеристичного значення міцності деревини на згин.

Результати вимірювань заносились до протоколів (див. додаток А). За результатами кожного вимірювання покрокового навантаження вираховувався

модуль пружності вздовж волокон при згині $E_{m,g}$ за формулою 3.2 та характеристичне значення міцності на згин f_m за формулою 3.3.

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (P_2 - P_1)}{b \cdot h^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right]; \quad (3.2)$$

де: l – відстань між опорами, см; b – ширина поперечного перерізу, см; h – висота поперечного перерізу, см; a – відстань між точкою навантаження та найближчою опорою, см; $(P_2 - P_1)$ – приріст навантаження, кН; $(w_2 - w_1)$ – приріст деформацій відповідний $(P_2 - P_1)$, см.

$$f_m = \frac{a \cdot P_{\max}}{2W}; \quad (3.3)$$

де: a – відстань між точкою навантаження та найближчою опорою, см; P_{\max} – максимальне навантаження, кН; W – момент опору перерізу, см³.

Модуль пружності при згині для кожного зразка визначався як середнє арифметичне від значень розрахунку вимірювань з діапазоном у межах пружної деформації (рис. 3.7), а загальне характеристичне значення міцності деревини на згин визначалась як середнє арифметичне між досліджуваними зразками та наведені в таблиці 3.2.

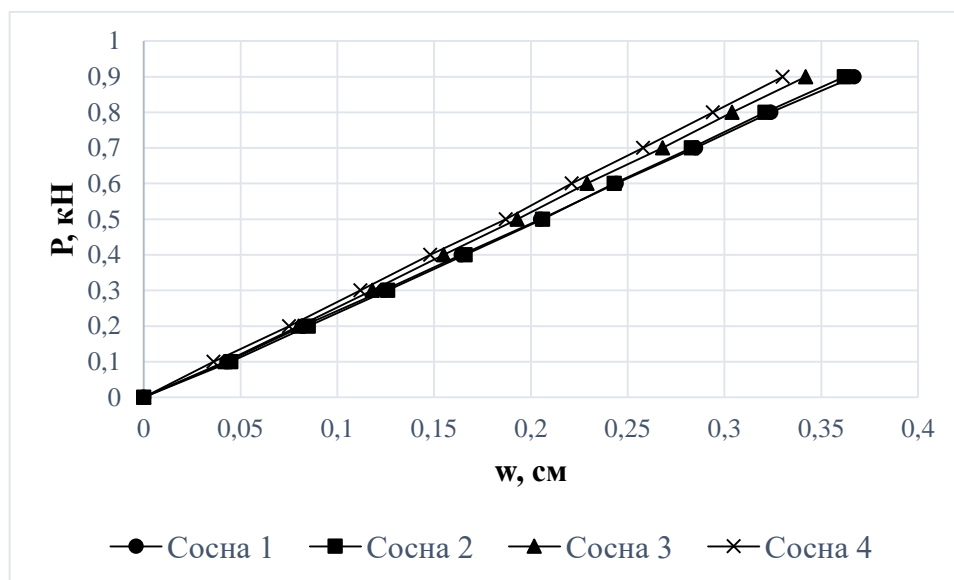


Рис. 3.7. Графік навантаження – деформація з діапазоном у межах пружної деформації для досліджуваних зразків.

Табл. 3.2. Значення модуля пружності та характеристичні значення міцності на згин для кожного зразка.

Найменування зразка	Модуль пружності при згині, $E_{m,g}$, кН/см ²	Характеристичне значення міцності при згині, f_m , кН/см ²
Сосна 1	1228,79	8,64
Сосна 2	1245,29	9,504
Сосна 3	1313,16	8,64
Сосна 4	1363,37	10,08
Середнє значення	1287,65	9,216

Отриманні результати визначення механічних властивостей деревини при згині в подальшому використовуватимуться для створення розрахункової моделі в програмних комплексах. Визначені механічні властивості деревини при згині порівнювались із загальноприйнятими в [19] та занесені до таблиці 3.3.

Табл. 3.3. Значення експериментальних та теоретичних модулів пружності та характеристичних значень міцності при згині для кожного зразка.

Найменування зразка	Експериментальний модуль пружності при згині, $E_{m,g}$, кН/см ²	Теоретичний модуль пружності при згині, $E_{m,g}$, кН/см ²	Експериментальне характеристичне значення міцності при згині, f_m , кН/см ²	Теоретичне характеристичне значення міцності при згині, f_m , кН/см ²
Сосна 1	1228,79	1200	8,64	3,0
Сосна 2	1245,29		9,504	
Сосна 3	1313,16		8,64	
Сосна 4	1363,37		10,08	
Середнє значення	1287,65		9,216	

Отримані результати підтверджують можливість використання в подальших розрахунках досліджуваних моделей теоретичних значень механічних характеристик деревини на згин у відповідності до [19] для класу міцності деревини С 30. Оскільки модуль пружності отриманий експериментальним шляхом менше ніж на 10% більший від теоретичного, а характеристичні значення міцності при згині за результатами натурних експериментів хоч і більші втричі за теоретичні значення за [19], проте для досліджуваної моделі потрібно використовувати коефіцієнти масштабованості, та тривалості дії навантаження, що дозволяє прийняти саме теоретичні значення для подальших розрахунків досліджуваних моделей балок з клеєної деревини.

3.2. Експериментальні випробування моделі балки з клеєної деревини.

При експериментальному дослідженні була поставлена задача визначення напружено-деформованого стану балки з клеєної деревини та порівняння досліджених результатів з напружено-деформованим станом тієї ж балки після підсилення нижньої (розтягнутої) зони моделі композитними стрічками *Sika CarboDur S512*, а також отримання закономірностей напружено-деформованого стану та їх порівняння з теоретичними даними. Основні фізико-механічні характеристики матеріалів випробувальної моделі занесені до додатку Б. Розіб'ємо експериментальні випробування моделі на три основні етапи:

1. Визначення напружено-деформованого стану балки з клеєної деревини;
2. Підсилення балки з клеєної деревини композитними стрічками *Sika CarboDur S512*;
3. Визначення напружено-деформованого стану балки з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками *Sika CarboDur S512*.

Фіброві деформації в поперечних перерізах вимірюються методом електротензометрування. Схема розміщення тензорезисторів наведена на рис. 3.19. Тензорезистори через блок дистанційного релейного перемикачання (БДРП) підключені до вимірювача статичних деформацій СИИТ-3. У експерименті застосовувались тензорезистори типу КФ5П1-10-200-Б-12 з базою 10 мм. Для вимірювання фібрових деформацій в середині прольоту встановлено поодинокі тензорезистори у поздовжньому напрямі по одному на зовнішніх дошках в перерізі балки та один на четверту з низу (одну з двох центральних) дошок в перерізі. Для вимірювання фібрових деформацій в при опорній зоні та в зоні дії зосереджених навантажень (лише по праву сторону від осі симетрії балки, оскільки по ліву сторону вони повинні бути аналогічними) встановлено тензометричні розетки – по 3 тензорезистора для одної точки, які розміщали вздовж осі зразка, перпендикулярно осі та під кутом 45° до поздовжньої осі симетрії.

Після приклеювання датчиків за допомогою мультиметра перевірялась їх працездатність, після чого напроти кожного датчика приклеювалась перехідна

одного боку унеможливити пересування динамометру, а з іншого, щоб показання годинникового індикатору на динамометрі було виставлено в "0" згідно попередньо проведеного тарування.

Між зразком і домкратами навантаження та опорами для мінімізації місцевого вмінання деревини були вставлені сталеві пластини довжиною не більше ніж половина висоти поперечного перерізу дослідного зразка.

Під віссю симетрії моделі (в середині прольоту) встановлювався індикатор годинникового типу (ІГТ) таким чином, щоб вимірювальний шток індикатора мав змогу вільно рухатись і приходив у вісь симетрії експериментального зразка для визначення величини вертикальних деформацій від дії прикладеного навантаження.

Випробування моделей виконувалось через певний час після закріплення вимірювальних приладів для забезпечення стабільності їх показань.

Перед самим початком випробувань тензометрична станція СІИТ-3 заземлювалась та вмикалась до мережі 220В. На блоці вимірювання виконувалось скидання попередніх налаштувань кнопкою "СБРОС", вибирався ручний режим вимірювань кнопкою "РУЧН.", виставлявся тип вимірювальної схеми кнопкою "1/4 М". Також записувались показання ІГТ.

Експериментальні дослідження проводились в лабораторії кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури для проведення тривалих досліджень. Схеми розміщення вимірювальних приладів та фотографія експериментальної установки наведено на рис. 3.19.

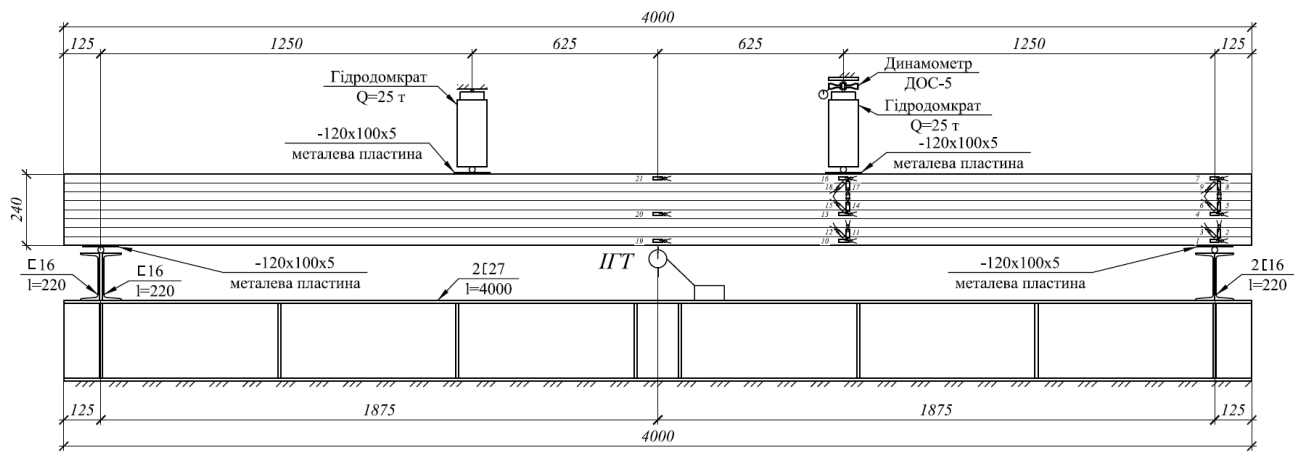


Рис. 3.19. Схем розміщення вимірювальних приладів та фотографія експериментальної установки.

Для першого та третього основних етапів експериментальних досліджень кожне випробування розбивалось на певну кількість послідовних навантажень і кожне навантаження поділялось на декілька етапів:

- навантаження моделі;
- конструкція витримувалась під навантаженням 15 хвилин;
- знімалися показання ПТ;
- знімалися показання тензOMETричної станції СИИТ-3;
- відбувався наступний крок навантаження із повторенням вище наведених етапів.

За допомогою насосу масло-станції виставлялось необхідне показання на індикаторі динамометра що відповідає необхідному навантаженню для поточного ступеня навантаження.

Показання тензорезисторів знімалось 5 разів на кожний канал тензометричної системи для кожного навантаження наступним чином:

- після попереднього навантаження виконувалось скидання каналу тензостанції натисканням кнопки "СБРОС";
- обирався необхідний канал кнопкою "ОДНОКР";
- по черзі натискались кнопки "НАЧАЛО" та "КОНЕЦ";
- після чого знімалось показання натисканням кнопки "ПУСК";
- кожне показання записувалось до таблиці із урахуванням знаку.

Ступеневе завантаження моделей відбувалося з кроком 5 кН, на одну вісь дії навантаження. На першому основному етапі випробувань навантаження проводилось до досягнення навантаженням максимального значення в 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження, яке не завдавало пошкоджень моделі. Після чого модель розвантажувалась та стабілізувалась, а згодом знімались показники в “нульовій” позиції. Далі від перехідної контактної групи, обережно, з одного боку розпаювались виводи тензорезисторів, та перехідна контактна група відклеювалась від тіла моделі не пошкоджуючи тензорезистори.

Для виконання другого основного етапу випробувань компанія *Sika AG* в Україні надала потрібні матеріали для підсилення моделі, а саме:

- композитні стрічки *Sika CarboDur S-512* (рис. 3.20, а) [22] для підсилення розтягнутої зони елемента;
- композитні полотна *Sika Wrap - 230 C/45* (рис. 3.20, б) [23] для анкерування композитних стрічок *Sika CarboDur S-512*, та сприйняття поперечних зусиль в приопорній зоні;
- розчином *Sika Colma-Cleaner* для змочування, очищення та активації композитних стрічок та полотен;

- клеї *Sikadur- 30* та *Sikadur- 330* [20-21] для наклеювання стрічок та полотен відповідно на досліджувану модель.

a)



б)



Рис. 3.20. а – композитні стрічки *Sika CarboDur S-512*; б – композитні полотна *Sika Wrap - 230 C/45*.

Основні фізико-механічні характеристики матеріалів випробувальної моделі занесені до додатку Б.

Перед початком виконання другого основного етапу потрібно обробити руки і незахищену шкіру захисним кремом. Застосовувати захисний одяг: спецодяг, захисні окуляри, респіратори, каски та рукавиці [100]. Поверхня наклеювання повинна бути чистою, знежиреною, гладкою, сухою і вільною від тирси та будь-яких інших забруднюючих речовин, як пилю, чужорідних частинок, масла, мастила, поверхневих покриттів, та інших речовин, які можуть несприятливо впливати на зв'язок кріплення системи до тіла моделі. Роботи виконувались механічним способом за допомогою наждачного паперу відповідно до технологічних вимог. На гранях дослідного зразка, де балка огортається полотном *Sika Wrap - 230 C/45*, виконувалась фаска радіусом 2 см.

Для наклеювання композитних стрічок *Sika CarboDur S-512* на тіло моделі їх потрібно розкласти на чисту тканину і провести активацію, ретельно очистити чистою ганчіркою змоченою розчином *Sika Colma-Cleaner*. Після активування,

зробити технологічну перерву від 15 до 30 хв. Стрічки необхідно очищати до моменту, поки на ганчірці не з'явиться чорний слід.

В технологічну перерву, тримаючи дистанцію від стрічок, щоб на них не потрапила волога, бруд чи інші забруднюючі частинки виконали приготування клею *Sikadur-30*. Компоненти А і В ретельно змішати в пакувальній тарі. Далі всю кількість компоненту В додати до компоненту А і перемішувати (не менше 3 хвилини) до отримання однорідного кольору. Перемішані компоненти А і В необхідно перекласти в чисту ємність і ще раз перемішати протягом 1 хвилини. Для перемішування застосовувати низько оборотний змішувач (до 600 об/хв). При використанні не всього клею дотримуватися пропорції змішування вказаній на упаковці (компоненти А:В=3:1 за масою), точно зважувати і дозувати кожну частину. Далі нанести шпателем або за допомогою спеціальної (заздалегідь виготовленої) установки (рис. 3.21 а) тонкий шар клею *Sikadur-30* на стрічку так, щоб вона в розрізі мала форму двосхилого даху, заввишки від 3 до 5 мм, або півкола. Добре перемішаний клей *Sikadur-30* ретельно втерти шпателем в заздалегідь приготовану і очищену поверхню моделі, вирівнюючи різні нерівності (рис. 3.21 б). Шар клею повинен мати товщину не менше 1 мм.

а)



б)



Рис. 3.21. Нанесення клею *Sikadur-30*: а – нанесення клею *Sikadur-30* на стрічку; б – нанесення клею *Sikadur-30* на поверхню моделі.

Приклеїти стрічки *Sika CarboDur S-512* на заздалегідь підготовлений і покритий клеєм елемент, що підсилюється. Валиком щільно притиснути до очищеної поверхні стрічки так, щоб весь зайвий клей по всій довжині виступив по обидві сторони стрічки. Зайвий клей прибрати ганчіркою (рис. 3.22).



Рис. 3.22. Композитні стрічки *Sika CarboDur S-512* наклеєні на досліджувану модель.

Через 24 години виконаємо анкерування стрічок за допомогою тканини з вуглецевих волокон, розташованих в одному напрямку *Sika Wrap - 230 C/45*. Матеріал доставляється в рулонах. Загинати тканину категорично заборонено! Всі вигини тканини повинні бути не більше радіуса тари катушки! Тканину слід розрізати ножицями або гострим ножем. Відрізаний шматок полотна укласти на чисту тканину і провести активацію, ретельно очистити чистою ганчіркою змоченою розчином *Sika Colma-Cleaner*. Зробити технічну перерву 15-30 хвилин. Під час активації не допускати потрапляння пилу, обов'язково забезпечити приплив свіжого повітря. Категорично забороняється палити і використовувати відкритий вогонь! Роботи проводити в захисних окулярах, гумових рукавичках та респіраторах.

Під час технічної перерви тримаючи дистанцію від активованих полотн приготували клей *Sikadur-330*. Компонент А і В ретельно змішати в ємностях. Далі всю кількість компоненту В додати до компоненту А і перемішувати у відповідності

як і для клею *Sikadur-30*. При використанні не всього клею дотримуватися пропорції змішування вказаній на упаковці (компоненти А:В=4:1 за масою), точно зважувати і дозувати кожен частину. *Sikadur-330* необхідно захистити від попадання вологи або конденсату на 24 годин.

Нанести шар клею *Sikadur-330* на основу моделі шпателем, валиком чи кисточкою (рис. 3.23 а). Просочити тканину клейовим матеріалом *Sikadur-330*. Вкласти вуглепластикову тканину *Sika Wrap - 230 C/45* в необхідному напрямку (перпендикулярно осі балки) на шар *Sikadur-330*. Ретельно вкатати тканину пластиковим валиком в шар клею в напрямку волокон так, щоб клей пройшов крізь волокна і рівномірно розподілився по поверхні всієї тканини. Не допускайте утворення складок і заломів на поверхні тканини (рис. 3.23 б). При вкатуванні уникати надмірних зусиль щоб унеможливити зморщування і викривлення тканин *Sika Wrap - 230 C/45*. Величина напустку вздовж волокон повинна складати не менше як 100 мм.

а)



б)



Рис. 3.23. Нанесення клею *Sikadur- 330*: а – нанесення клею *Sikadur- 330* на основу моделі; б – вкатане полотно *Sika Wrap - 230 C/45* в клей *Sikadur- 330* на поверхню моделі.

Після досягнення клеями максимальної міцності (через 7 днів після наклеювання), залишки клею потрібно зашліфувати наждачним папером, та підсилену експериментальну модель повернути в установку для проведення подальших досліджень, як описано раніше. Схема розміщення вимірювальних приладів, підсиленої моделі та фотографія випробувань наведено на рис. 3.24.

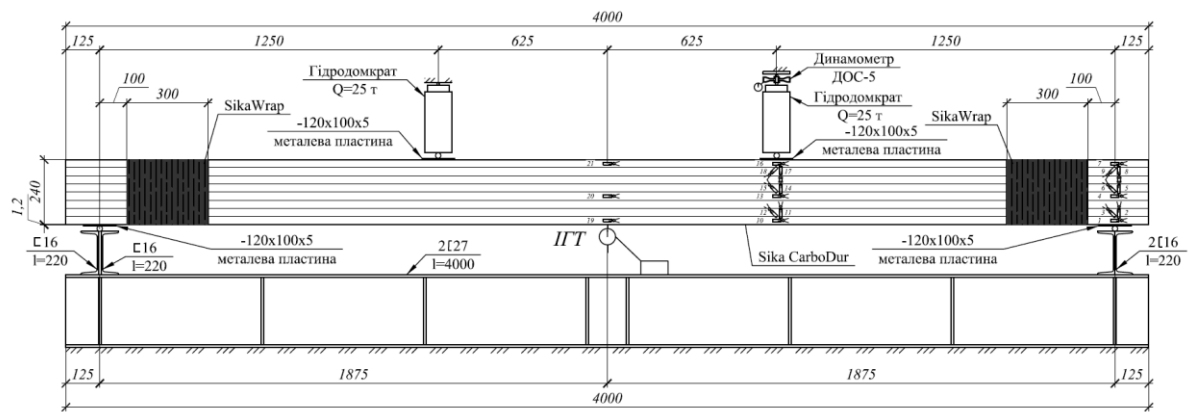


Рис. 3.24. Схем розміщення вимірювальних приладів, експериментальної моделі підсиленої композитними стрічками та фотографія випробувань.

На третьому основному етапі випробувань ступеневе завантаження підсиленої моделі відбувалося з кроком 5 кН, на одну вісь прикладання навантаження, дозавантаження проводилось до першого пошкодження експериментальної моделі. При кожному завантаженні знімалися показники описані раніше за тією ж методикою.

В результаті проведення експерименту встановлено параметри деформування експериментальних моделей, фактичні модулі пружності при згині, максимальні повздовжні напруження по центру прольоту, по осі прикладання навантаження та по осі опори, також, максимальні поперечні та дотичні напруження по осі прикладання навантаження та по осі опори. Визначено фактичну максимальну несучу здатність експериментальної моделі підсиленої композитними стрічками.

3.3. Результати експериментальних випробувань моделі балки з клеєної деревини.

Експериментально доведено що, прийнятий в розділі 3.1, модуль пружності деревини при згині відповідає реальному модулю пружності досліджуваного експериментального зразка без підсилення, який визначався за формулою 3.1, та дорівнює середньому арифметичному значенню $E_{m,g} = 1205,42 \text{ кН/см}^2$.

Аналіз напружено-деформованого стану експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження дає чітке розуміння, що композитні стрічки *Sika CarboDur S512* наклеєні на розтягнуту зону балки з клеєної деревини, зменшують вертикальні деформації (рис. 3.25) на величину до 13%.

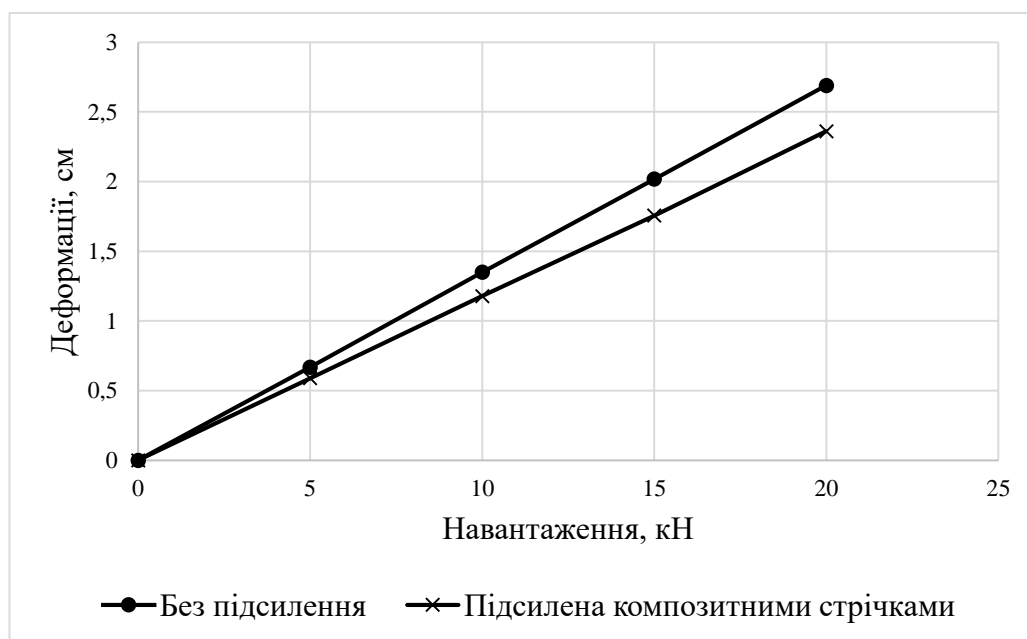


Рис. 3.25. Графік максимальних вертикальних деформацій експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Визначення напружень виконувалось за формулами:

$$\sigma_x = E_x \cdot \left(\frac{\varepsilon_x + \nu_{yx} \cdot \varepsilon_y}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} \right), \quad (3.3)$$

$$\sigma_y = E_y \cdot \left(\frac{\varepsilon_y + \nu_{xy} \cdot \varepsilon_x}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} \right), \quad (3.4)$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \left[2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \right], \quad (3.5)$$

де E_x , E_y - модулі пружності деревини відповідно вздовж та поперек волокон;
 ν_{xy} , ν_{yx} - коефіцієнти поперечної деформації деревини (Пуассона); G - модуль зсуву деревини; ε_x , ε_y , ε_{45} - відносні деформації вздовж, поперек та під кутом 45° до волокон деревини.

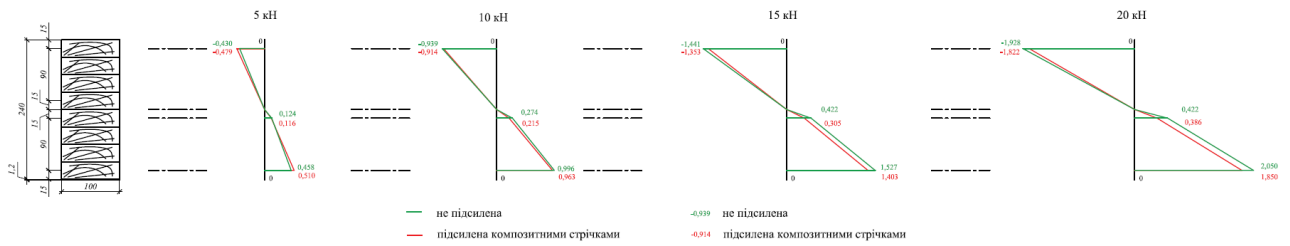
Відносні деформації визначаються за формулою $\varepsilon_i = (\Delta_i - \Delta_0) \cdot n$, в якій $n = 2 \cdot 10^{-6}$ - ціна поділки вимірювача деформацій СИИТ-3.

За отриманими значеннями напружень побудовані епюри порівняння максимальних повздовжніх, поперечних та дотичних напружень в основних досліджуваних перерізах деревини (по центру прольоту, по осі прикладання лінійного навантаження та по осі опори) експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження, які наведені на рис. 3.26 – 3.28.

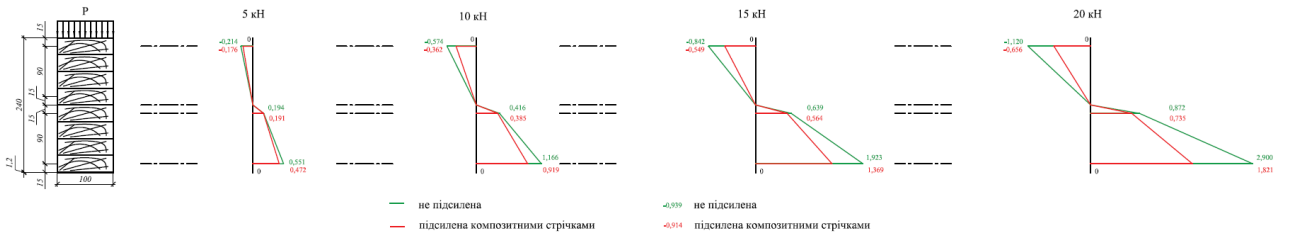
Для більш детального аналізу напружень в досліджуваних перерізах розділимо їх на три зони дослідження, а саме:

1. стиснута (в першій згорі дощці клеєного перерізу);
2. середня (в п'ятій згорі дощці клеєного перерізу);
3. розтягнута (в восьмій згорі дощці клеєного перерізу).

Епюри максимальних повздожніх напружень в деревині по центру прольоту при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних повздожніх напружень в деревині по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних повздожніх напружень в деревині по осі опори при відповідному значенні навантаження

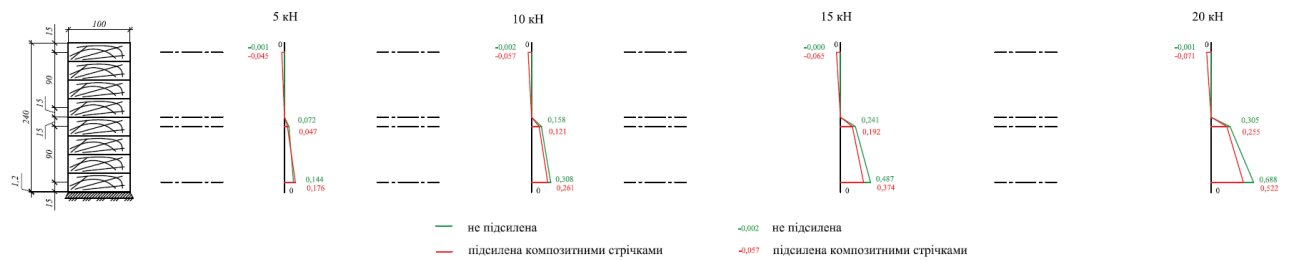
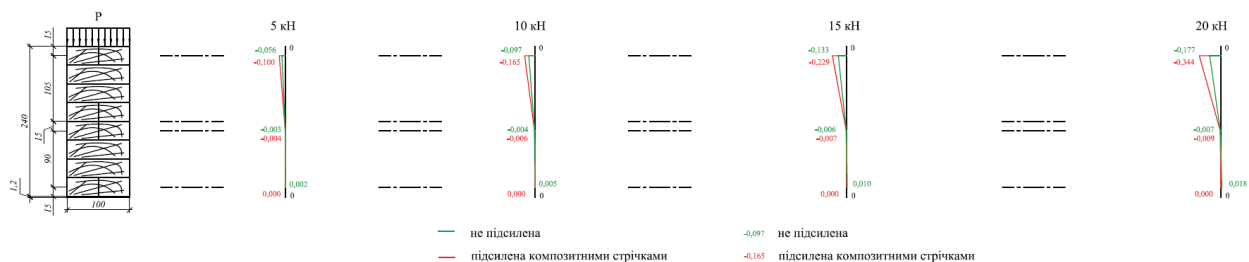


Рис. 3.26. Максимальні повздожні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Максимальні повздожні напруження (σ_x) в середині прольоту зменшились в стиснутій зоні на величину до 7%, в середній зоні до 33%, в розтягнутій до 10%. Максимальні повздожні напруження по осі прикладання навантаження зменшились в стиснутій зоні на величину до 42%, в середній зоні до 16%, в розтягнутій до 38%. Максимальні повздожні напруження по осі опори зменшились в середній зоні на величину до 35%, в розтягнутій до 25%.

Епюри максимальних поперечних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних поперечних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

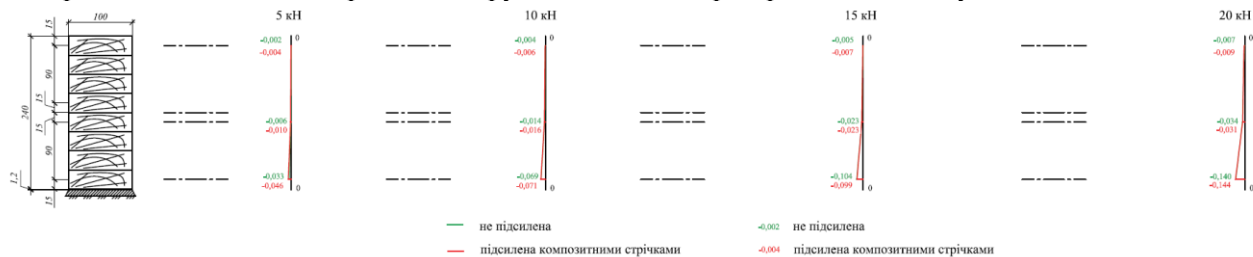


Рис. 3.27. Максимальні поперечні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Максимальні поперечні напруження (σ_y) по осі прикладання навантаження збільшились в стиснутій зоні на величину до 49%, в середній зоні до 33%. Максимальні поперечні напруження по осі опори збільшились в стиснутій зоні на величину до 57%, в середній зоні до 39%, в розтягнутій до 29%.



Рис. 3.28. Максимальні дотичні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Максимальні дотичні напруження (τ_{xy}) по осі прикладання навантаження збільшились в стиснутій зоні на величину до 62%, в середній зоні до 22%, в розтягнутій до 37%. Максимальні дотичні напруження по осі опори зменшились в стиснутій зоні на величину до 54%, в середній зоні до 77%, в розтягнутій до 79%.

Отже, можемо зробити висновок, що підсилення композитними стрічками перерозподіляє напруження в деревині, зменшуючи повздовжні напруження в усіх досліджуваних перерізах. Різниця зменшення повздовжніх напружень в досліджуваних перерізах в розтягнутій зоні збільшується при збільшенні навантажень. Проте, поперечні та дотичні напруження, в досліджуваних перерізах збільшуються, що варто враховувати при дослідженні складного напруженого стану конструкцій з клеєної деревини.

Руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками відбулось при навантаженні 30 кН, на одну вісь прикладання навантаження, яке відбулось у перерізі осі прикладання навантаження по одному з

вказаних початкових дефектів (рис. 3.1) в зоні концентрації максимальних напружень. Загальний вигляд експериментального зразка після перших ознак втрати міцності наведено на рис. 3.29.

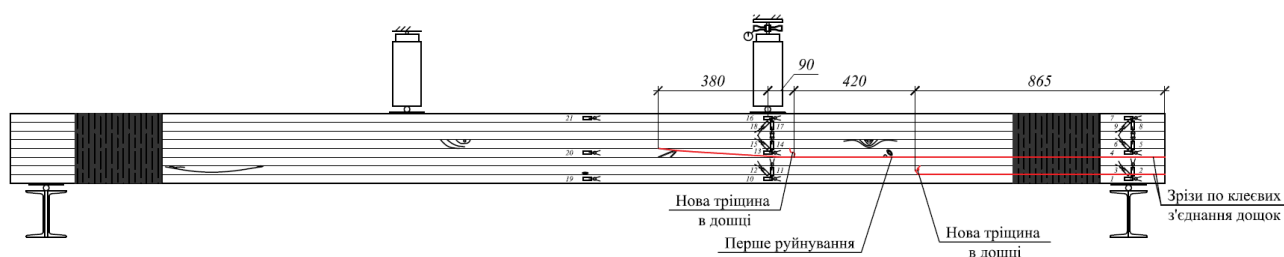
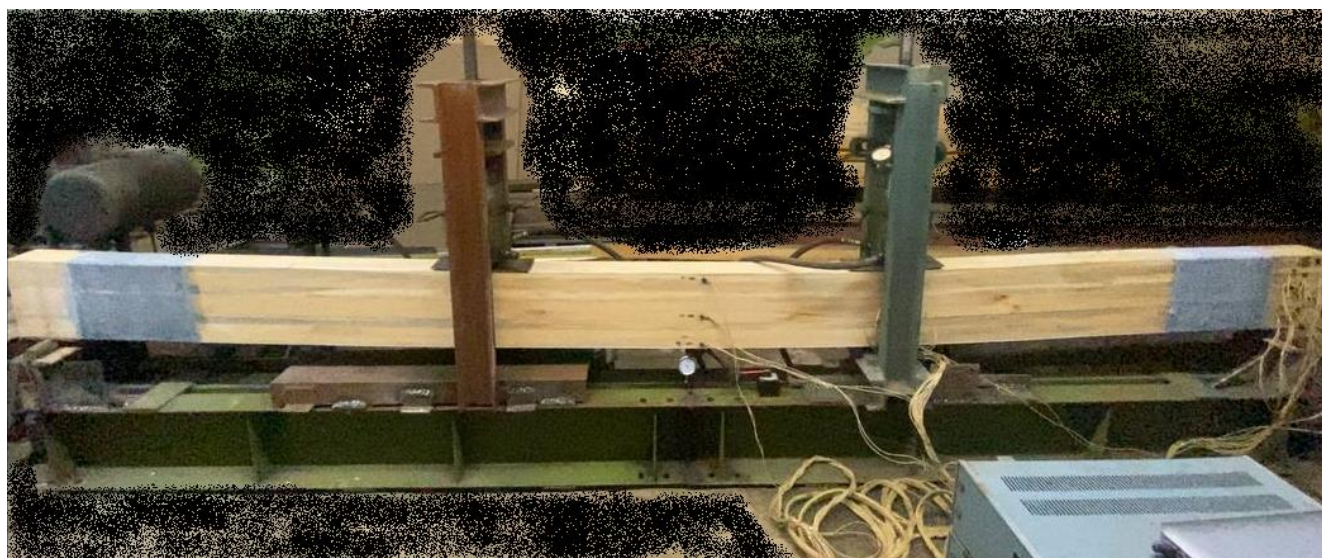


Рис. 3.29. Загальна вигляд та схема експериментального зразка після перших ознак втрати міцності.

Для визначення максимального розрахункового навантаження на одну вісь прикладання навантаження максимальний розрахунковий опір деревини не підсиленої композитними стрічками визначався відповідно до [19] за формулою:

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (3.6)$$

в якій k_{mod} – коефіцієнт модифікації міцності для відповідного класу експлуатації та навантаження; $f_{m,k}$ – характеристичне значення міцності деревини для визначеного класу міцності при згині; γ_M – коефіцієнт надійності за матеріалом.

Оскільки коефіцієнт k_{mod} залежить від вологості навколишнього середовища та терміну дії навантаження, його можна прийняти рівним одиниці оскільки

експеримент проводився в лабораторних умовах, а термін дії навантажень близький до миттєвого.

Табл. 3.3. Значення максимальних навантажень на одну вісь дії навантаження експериментального зразка.

Максимальне розрахункове навантаження, кН	Максимальне розрахункове навантаження при $k_{mod}=1$, кН	Максимальне навантаження, що прикладалось на не підсилений зразок, кН	Максимальне навантаження, що витримав зразок підсилений композитними стрічками, кН
16,58	18,43	20	30

Як видно з таблиці 3.3, максимальне навантаження на одну вісь прикладання навантаження експериментального зразка підсиленого композитними стрічками, є на 63% більшим за граничне максимальне розрахункове навантаження при $k_{mod}=1$ та на 80% більшим за максимальне розрахункове навантаження з урахуванням коефіцієнту k_{mod} розрахованим відповідно до [19] експериментального зразка не підсиленого композитними стрічками.

3.4. Висновки по розділу 3.

Після проведення аналізу експериментальних досліджень напружено-деформованого стану балки з клеєної деревини підсиленої композитними стрічками можна зробити такі висновки:

1. Визначення механічних властивостей деревини при згині, методом випробування зразків деревини з однієї партії, дає достовірне значення модулю пружності для застосування його в розрахунку реальних конструкцій.

2. Визначено алгоритм проведення експериментального дослідження балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками за допомогою електротензометрії.

3. Визначено послідовність виконання підсилення балок з клеєної деревини композитними стрічками *Sika CarboDur S512*.

4. Підсилення експериментального зразка шляхом наклеювання на розтягнуту зону композитних стрічок, зменшує вертикальні деформації на величину до 13%.

5. Руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками відбулось при значенні, яке є на 63% більшим за граничне максимальне розрахункове навантаження при $k_{mod} = 1$ та на 80% більшим за максимальне розрахункове навантаження з урахуванням коефіцієнту k_{mod} розрахованим відповідно до ДБН В.2.6-161:2017 експериментального зразка не підсиленого композитними стрічками.

6. За якісним характером напруженого стану деревини отриманого експериментальним дослідження в балках з клеєної деревини та в балках з клеєної деревини підсилених композитними стрічками чітко видно, що максимальні повздовжні напруження в підсилених балках зменшились до 42%, максимальні дотичні напруження збільшились в підсилених балках до 57%, а дотичні збільшились в деяких перерізах і до 79%.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ

4.1. Чисельні дослідження експериментальної моделі балки з клеєної деревини.

Для аналізу роботи моделі та результатів експериментальних випробувань розроблено чисельну модель зразка балки з клеєної деревини. Дослідження реалізовано в середовищі ПК ЛІРА-САПР, що використовує математичний апарат методу скінчених елементів у формі переміщень. Мета розробки чисельної моделі полягає у визначенні напружень в перерізах моделі, визначенні вертикальних деформацій та порівняння отриманих результатів, з натурними експериментальними випробуваннями.

Для моделювання взято зразки балок з клеєної деревини без підсилення (рис. 4.1.) та з підсиленням композитними стрічками *Sika CarboDur S512* (рис. 4.2.). Поперечний переріз балки $b \times h = 10 \times 24$ см, складається з восьми шарів дошок деревини одного класу міцності С 30, які для чисельних досліджень, моделювались об'ємними СЕ №36. Розмір скінчених елементів прийнято 1 (h) x 1 x 1 см, з наступними механічними властивостями:

- модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,\text{mean}} = 12000$ МПа;
- модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,\text{mean}} = 400$ МПа;
- модуль зсуву $G = G_{\text{mean}} = 750$ МПа;
- коефіцієнти поперечної деформації (Пуассона) деревини $\nu_{12} = 0,016$ та $\nu_{21} = 0,48$.

В'язі прийнято X, Y, Z в нижній зоні по всій ширині перерізу з ліва на відстані 125 мм, від кінця балки та Z в нижній зоні з права на відстані 125 мм, від торця балки.

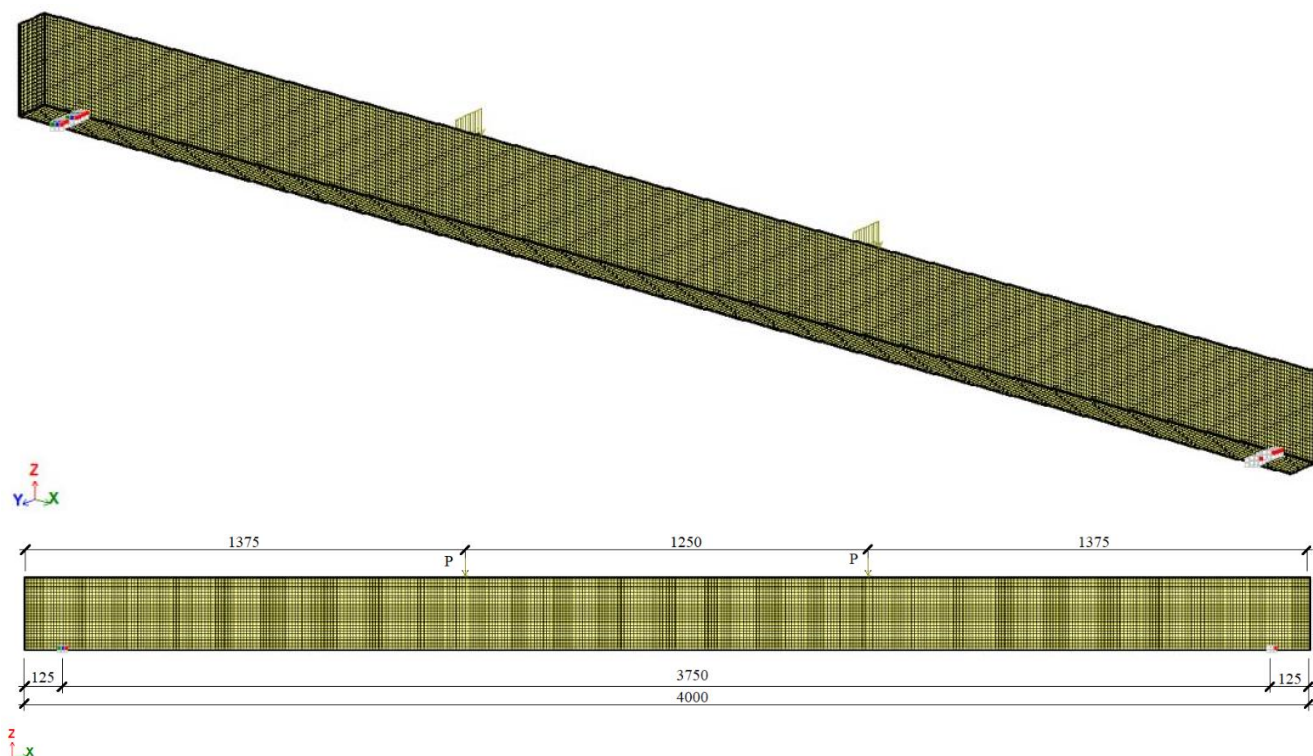


Рис. 4.1. Чисельна модель експериментального зразка балки з клеєної деревини без підсилення розроблена в середовищі ПК ЛІРА-САПР.

При моделюванні балок з підсиленням композитними стрічками *Sika CarboDur S512* товщиною $t = 0,12$ см, моделювались об'ємними СЕ №36. Розмір скінчених елементів прийнято $0,12 (h) \times 1 \times 1$ см, додатково задавались механічні характеристики самої стрічки:

- модуль пружності вздовж волокон $E_1 = E_{0,\text{mean}} = 170\,000$ МПа;
- Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

Та додатково для анкерування стрічок *Sika CarboDur S512* моделювались полотна *Sika Wrap - 230 C/45* на відстані 10 см, від опори шириною 30 см, товщиною $t = 0,0129$ см, об'ємними СЕ №36. Розмір скінчених елементів прийнято $1 (h) \times 1 \times 0,0129 (t)$ см, механічні характеристики полотна:

- модуль пружності вздовж волокон $E_1 = E_{0,\text{mean}} = 220$ МПа;
- коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

В'язі прийнято X, Y, Z в нижній зоні по всій ширині перерізу з ліва на відстані 125 мм, від кінця балки та Z в нижній зоні з права на відстані 125 мм, від торця балки.

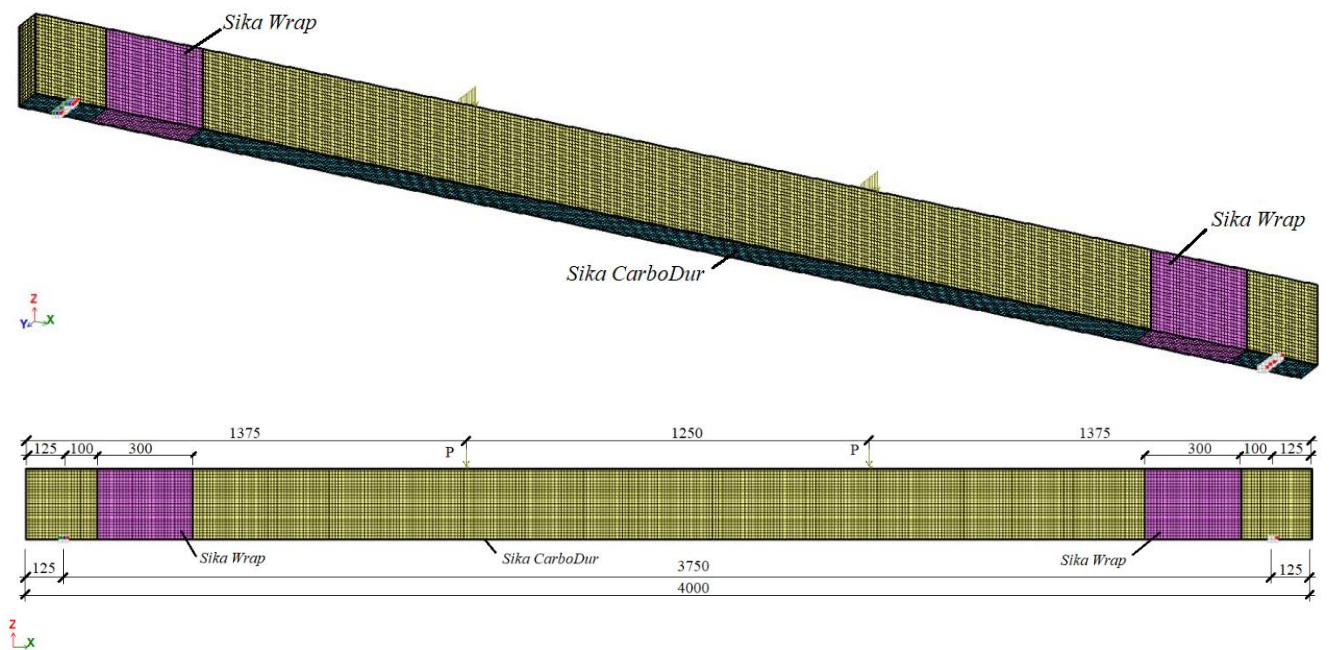


Рис. 4.2. Модель експериментального зразка балки з клеєної деревини з підсиленням композитними стрічками розроблена в середовищі ПК ЛІРА-САПР.

Навантаження прикладено у вигляді лінійних сил на всю ширину поперечного перерізу моделі балки за напрямом осі Z , на відстані 125 см, від опор через фіктивну балку без жорсткості. При розрахунку в лінійній постановці, але з врахуванням ортотропних властивостей матеріалу, виконано аналіз вертикальних деформацій, максимальних повздовжніх, поперечних та дотичних напружень. Для аналізу загального характеру деформацій в моделях експериментальних зразків ізопля вертикальних деформацій, максимальних нормальних, поперечних та дотичних напружень при максимальних навантаженнях по 20 кН, на одну вісь дії навантаження, наведено на рис. 4.3 –4.6.

Ізополя вертикальних деформацій моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини

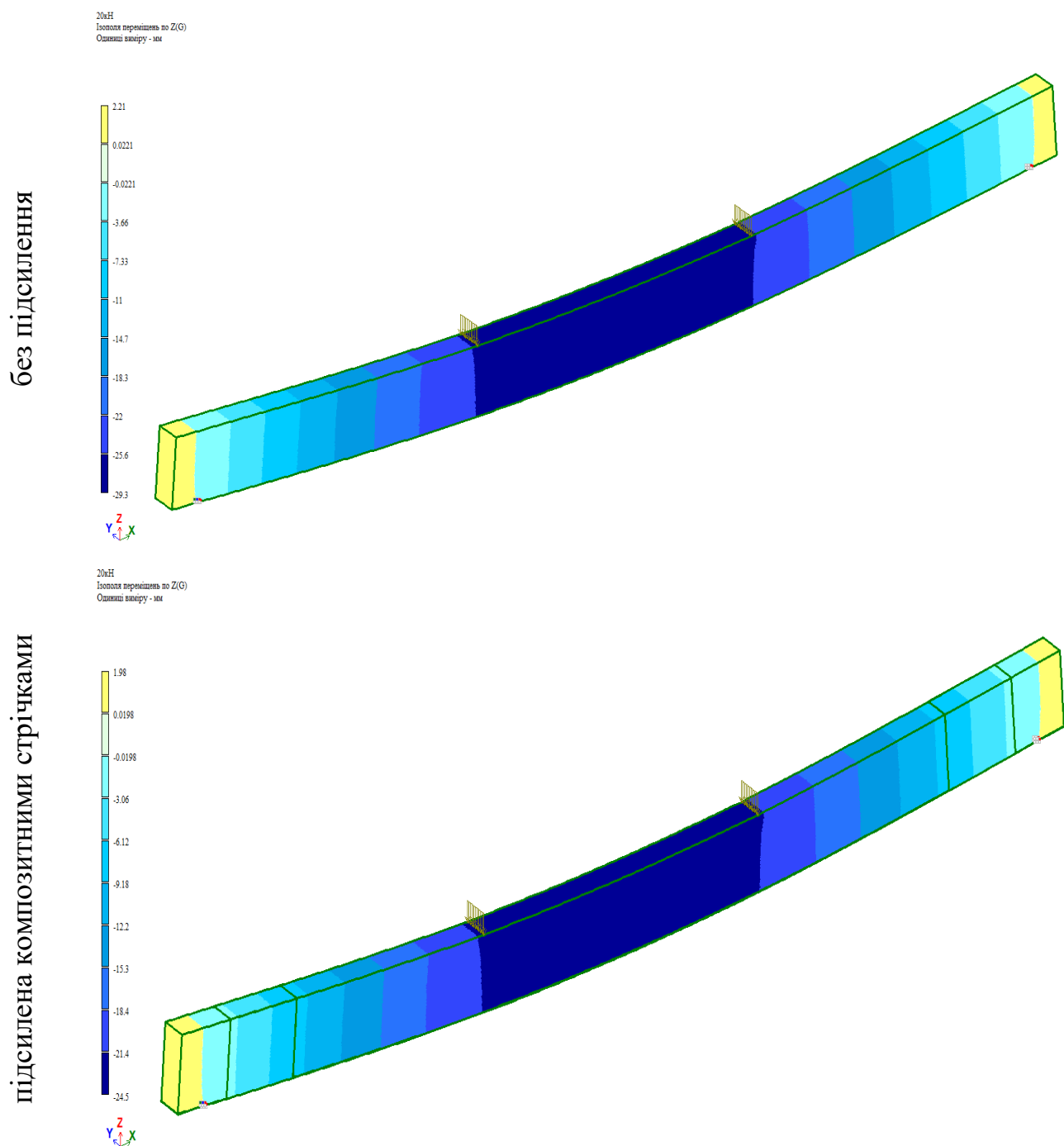


Рис. 4.3. Вертикальні деформації моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини, розробленої в середовищі ПК ЛІРА-САПР, без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при максимальних навантаженнях по 20 кН на одну вісь дії навантаження.

Ізополю максимальних повздовжніх напружень моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини

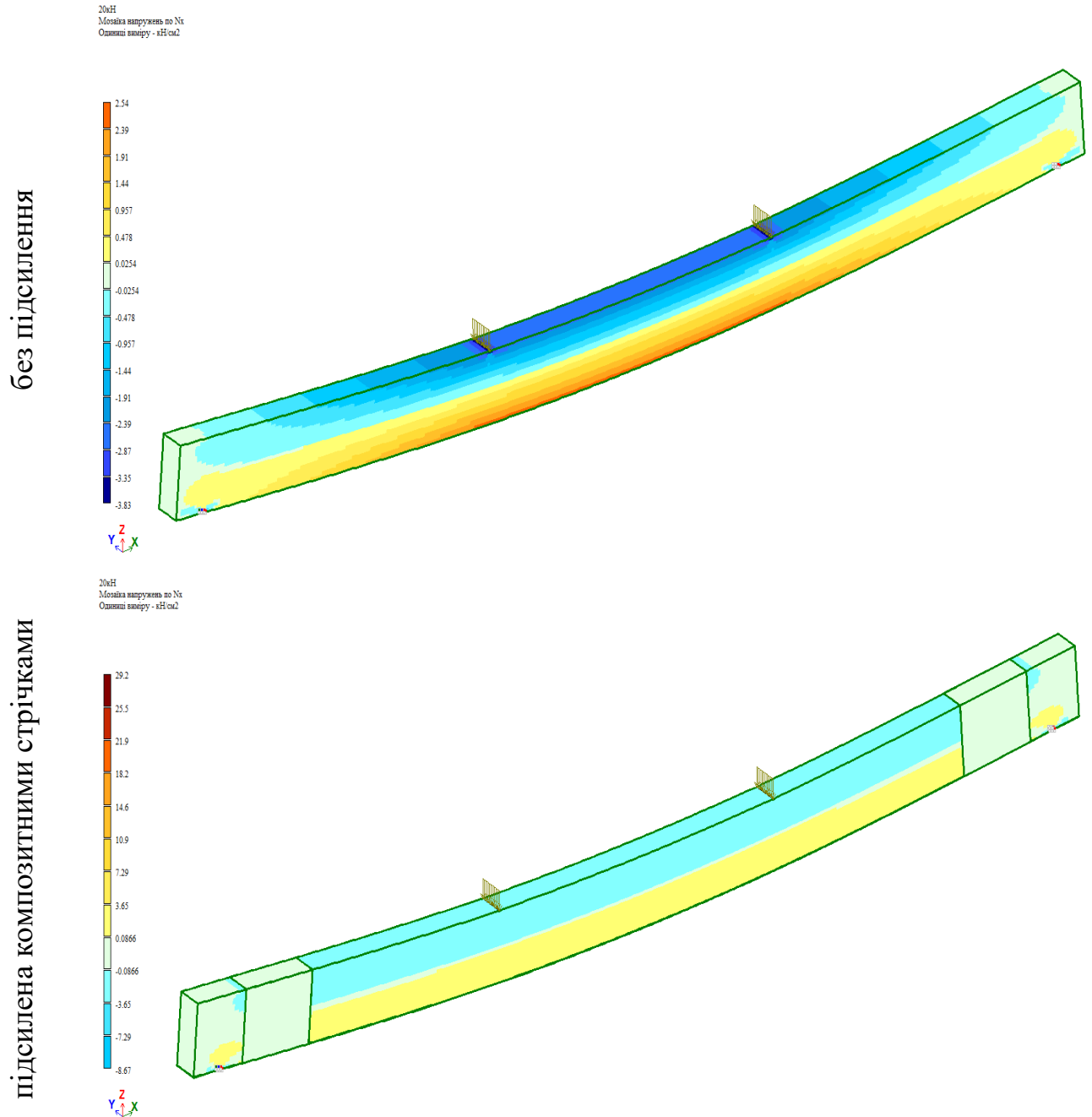


Рис. 4.4. Максимальні повздовжні напруження моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини, розробленого в середовищі ПК ЛІРА-САПР, без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при максимальних навантаженнях по 20 кН на одну вісь дії навантаження.

Ізополя максимальних поперечних напружень моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини

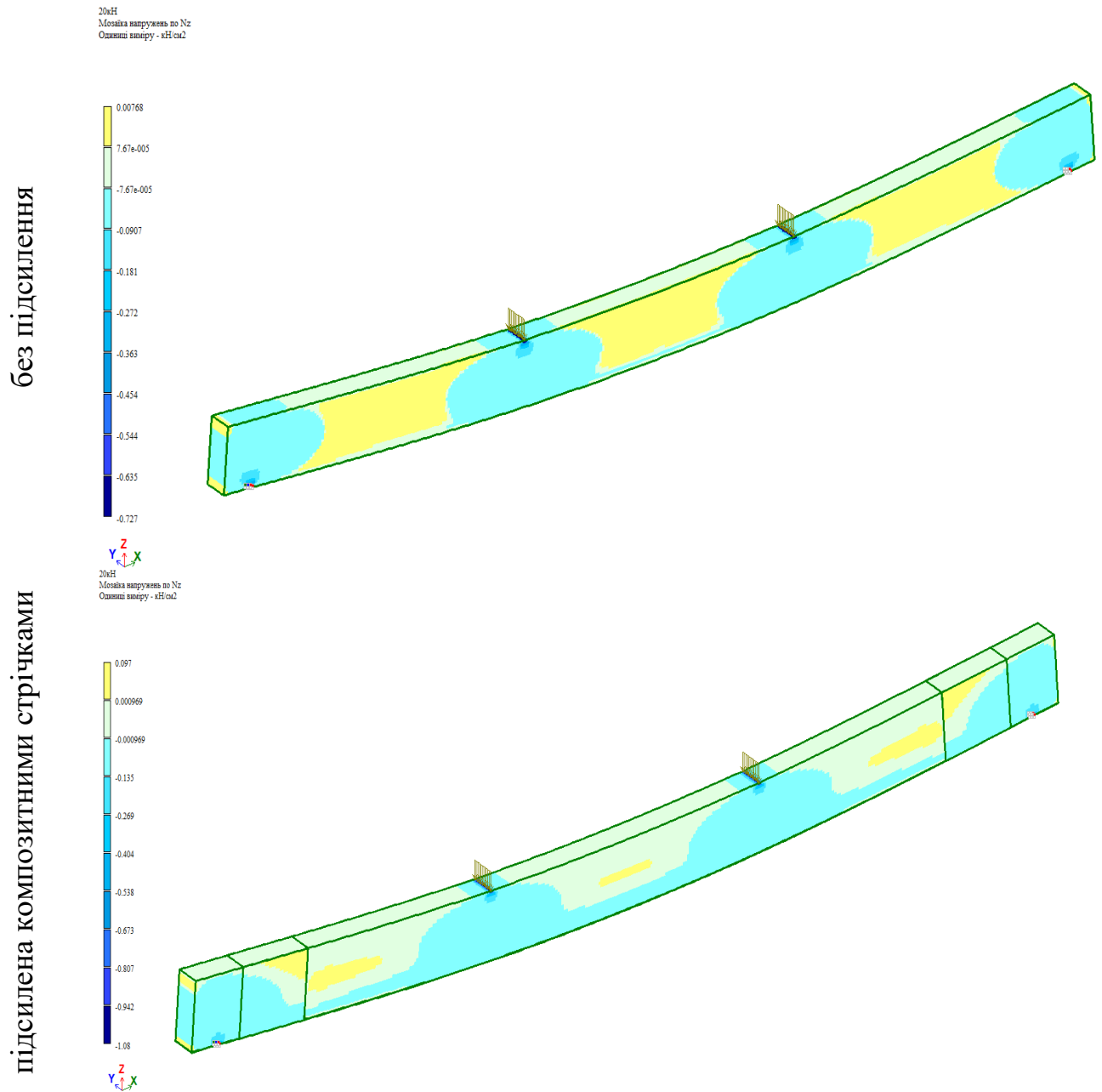


Рис. 4.5. Максимальних поперечні напруження моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини, розробленої в середовищі ПК ЛІРА-САПР, без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при максимальних навантаженнях по 20 кН на одну вісь дії навантаження.

Ізополя максимальних дотичних напружень моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини

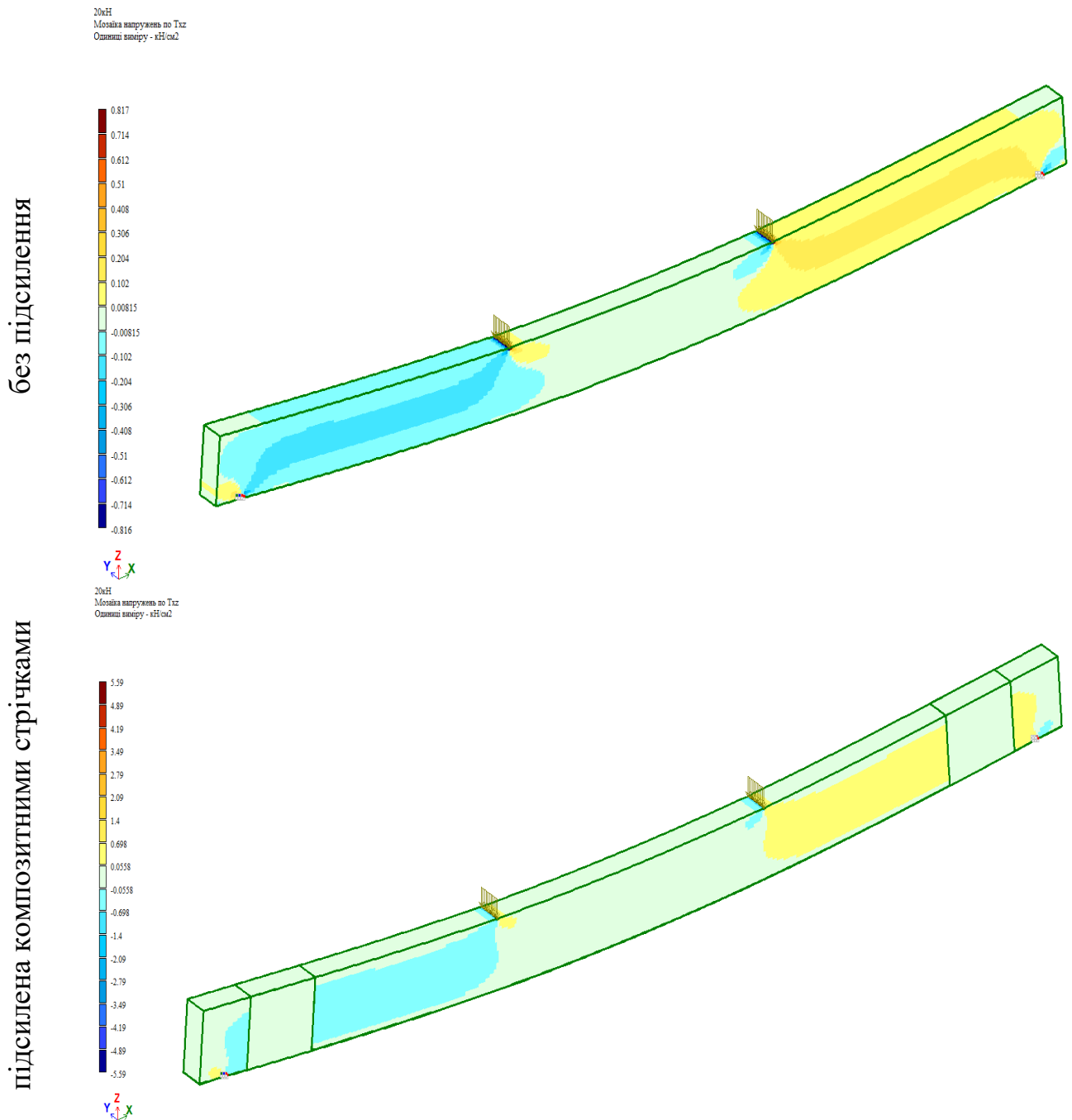


Рис. 4.6. Максимальних дотичних напруження моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини розробленого в середовищі ПК ЛІРА-САПР без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при максимальних навантаженнях по 20 кН на одну вісь дії навантаження.

Для більш детального аналізу напружено-деформованого стану деревини в основних досліджуваних перерізах (по центру прольоту, по осі дії навантаження та по осі опори) побудовано графік вертикальних деформацій та епюри порівняння максимальних повздовжніх, поперечних та дотичних напружень при значенні навантажень по 5, 10, 15, 20 кН на одну вісь дії навантаження моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини без підсилення та підсиленої композитними стрічками наведено на рис. 4.7 –4.10.

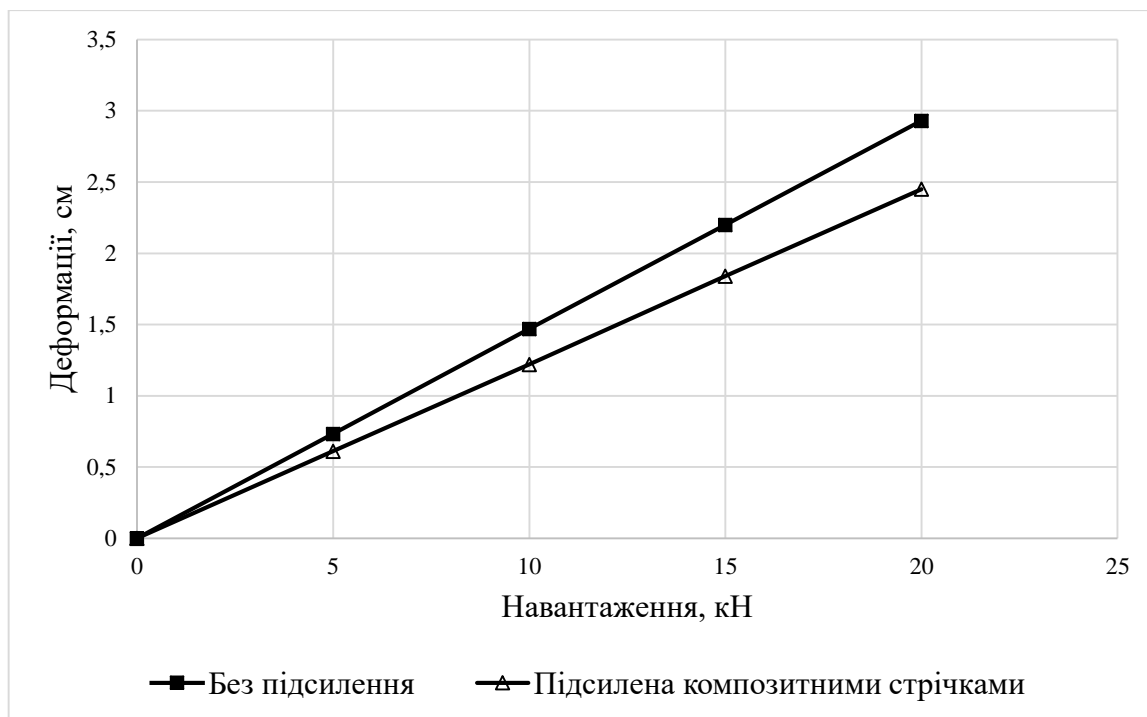
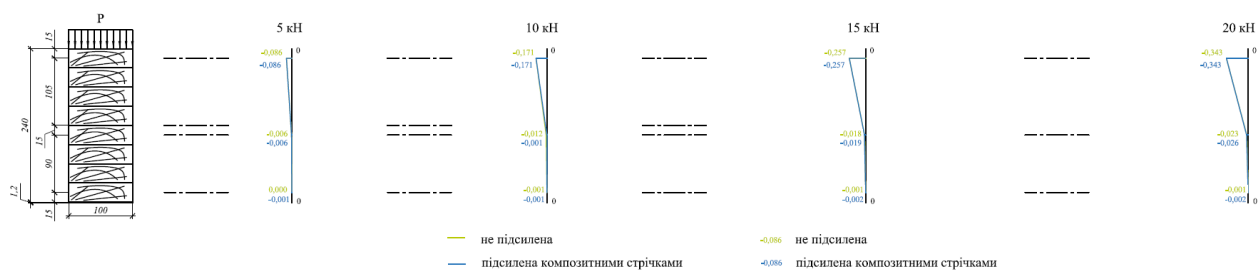


Рис. 4.7. Графік максимальних вертикальних деформацій моделі експериментального зразка балки з клеєної деревини, розробленої в середовищі ПК ЛІРА-САПР, без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при значенні навантажень по 5, 10, 15, 20 кН на одну вісь дії навантаження.

З отриманих результатів чисельного дослідження балки з клеєної деревини реалізованого в середовищі ПК ЛІРА-САПР можемо зробити висновки, що в підсиленій моделі експериментального зразка відносно до не підсиленої моделі максимальні вертикальні деформації зменшуються до 17%.

Епюри максимальних поперечних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних поперечних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

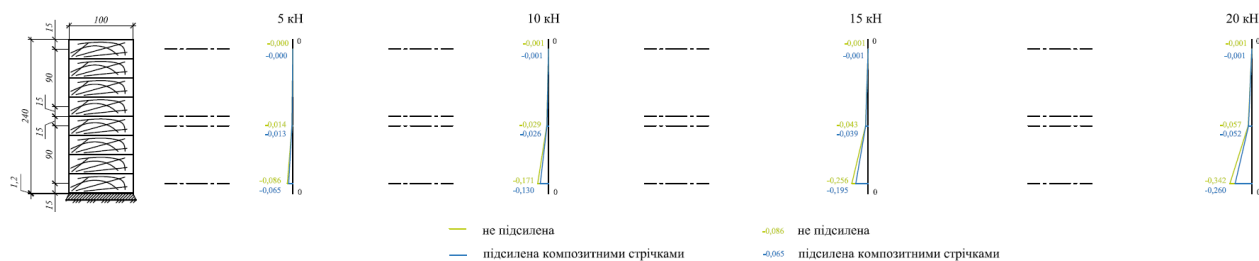
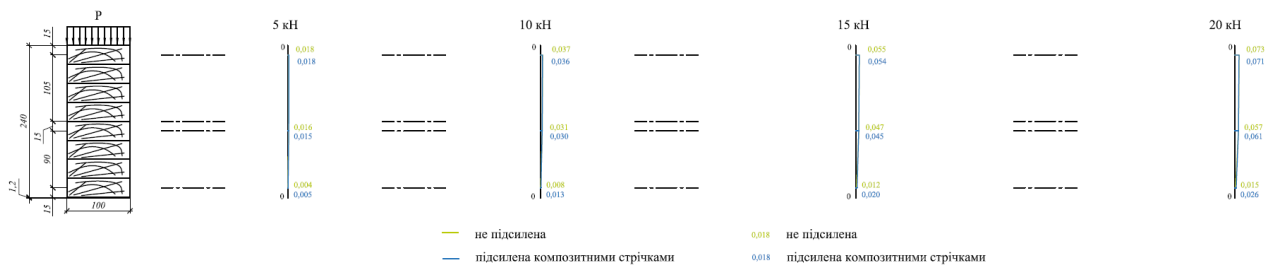


Рис. 4.9. Максимальні поперечні напруження в розрахункових перерізах досліджуваних зразків моделі балки з клеєної деревини, розробленої в середовищі ПК ЛІРА-САПР, без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при значенні навантажень по 5, 10, 15, 20 кН на одну вісь дії навантаження.

З отриманих результатів дослідження чисельного зразка реалізованого в середовищі ПК ЛІРА-САПР можемо зробити висновки, що в підсиленій моделі експериментального зразка відносно до не підсиленої моделі максимальні поперечні напруження по осі прикладання навантаження відсоткової різниці фактично не мають, а по осі опори зменшились на величину до 24% в розтягнутій зоні. В стиснутій зоні максимальні поперечні напруження, по осі прикладання навантаження зменшуються на величину до 12%, а по осі опори до 15%.

Епюри максимальних дотичних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних дотичних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

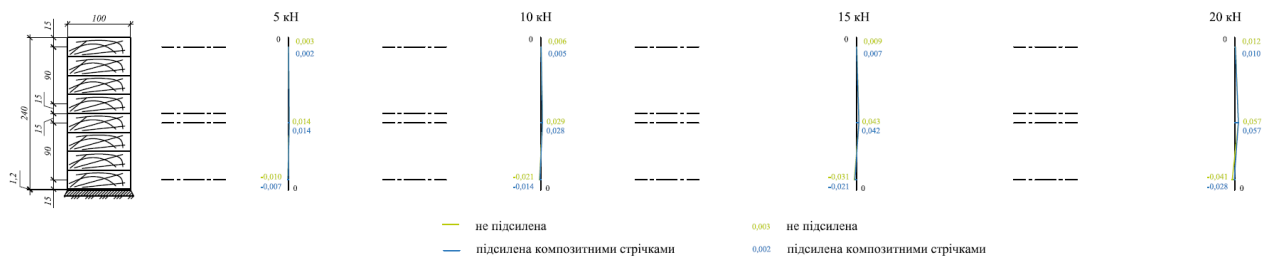


Рис. 4.10. Максимальні дотичні напруження в розрахункових перерізах досліджуваних зразків моделі балки з клеєної деревини, розробленої в середовищі ПК ЛРА-САПР, без підсилення та підсиленої композитними стрічками, при значенні навантажень по 5, 10, 15, 20 кН на одну вісь дії навантаження.

З отриманих результатів дослідження чисельної моделі реалізованої в середовищі ПК ЛРА-САПР можемо зробити висновки, що в підсиленій моделі експериментального зразка відносно до не підсиленої моделі максимальні дотичні напруження по осі дії навантаження збільшуються на величину до 43%, а по осі опори зменшились на величину до 33% в розтягнутій зоні. В стиснутій зоні максимальні дотичні напруження, по осі прикладання навантаження зменшуються на величину до 3%, а по осі опори до 19%.

4.2. Аналіз результатів чисельних та експериментальних досліджень

Після проведених досліджень, доцільно, порівняти результати отримані за допомогою чисельного моделювання в середовищі ПК ЛІРА-САПР та за допомогою проведення експерименту.

Для більш детального аналізу, такого, порівняння напружено-деформованого стану деревини в основних досліджуваних перерізах (по центру прольоту, по осі прикладання навантаження та по осі опори) побудовано графік вертикальних деформацій та епюри порівняння максимальних повздовжніх, поперечних та дотичних напружень при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження моделі експериментального зразка без підсилення та підсиленого композитними стрічками отримані шляхом чисельного моделювання та проведенням експерименту наведено на рис. 4.11 – 4.19.

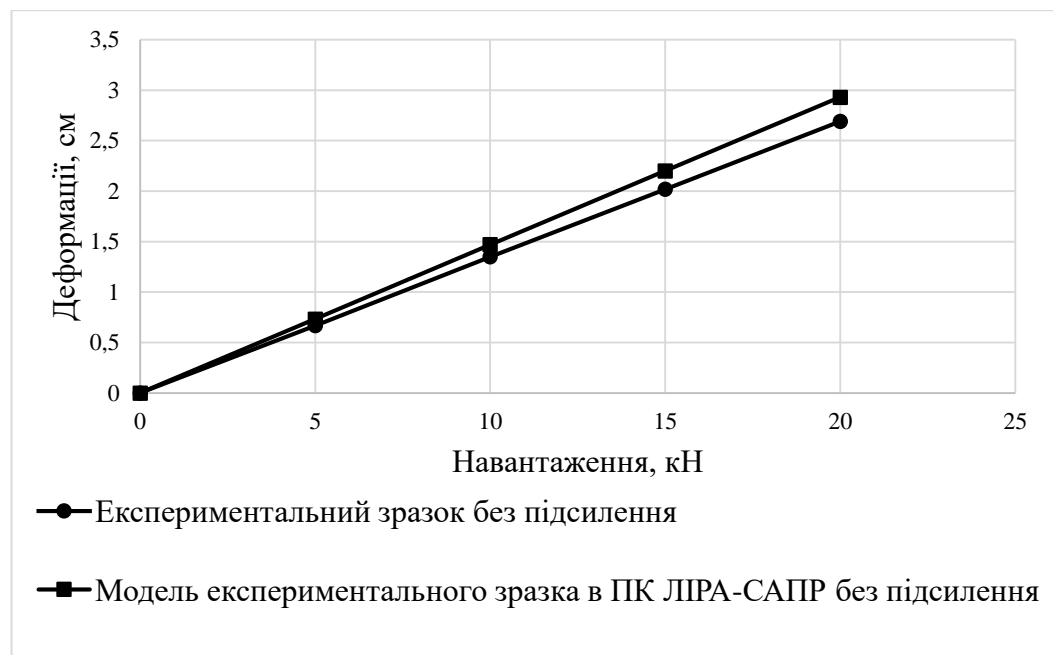


Рис. 4.11. Графік максимальних вертикальних деформацій експериментального зразка без підсилення та моделі експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР без підсилення, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Різниця максимальних вертикальних деформацій між експериментальним зразком та моделлю експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР без підсилення при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь дії навантаження становить до 9%.

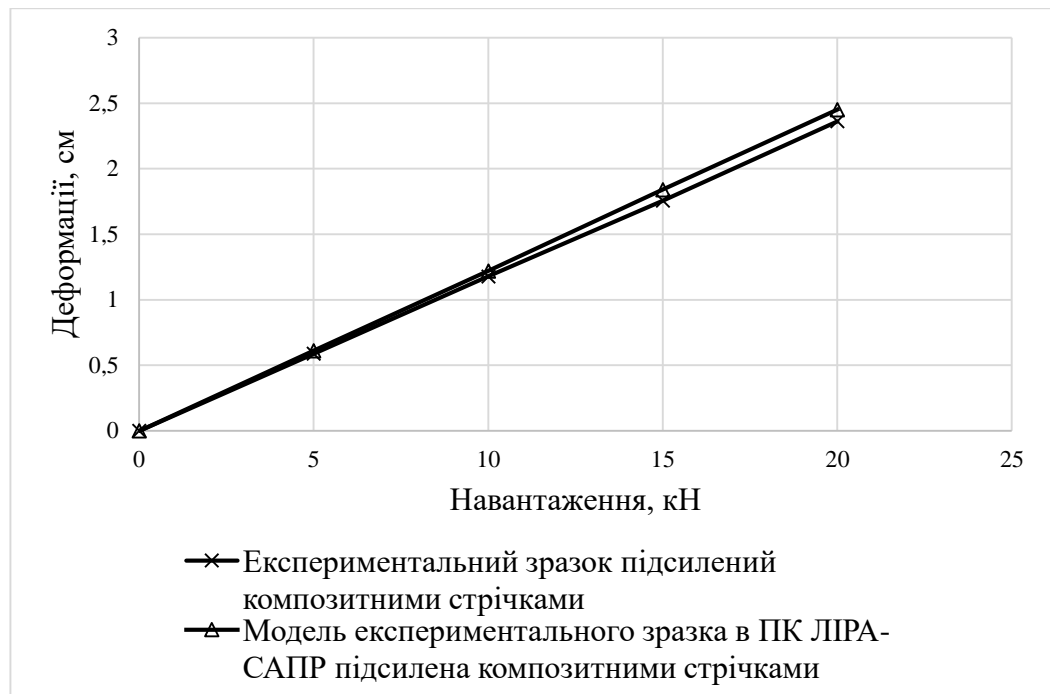
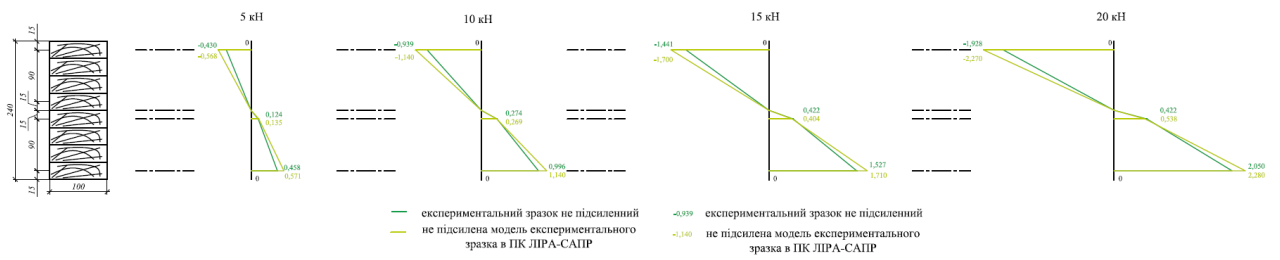


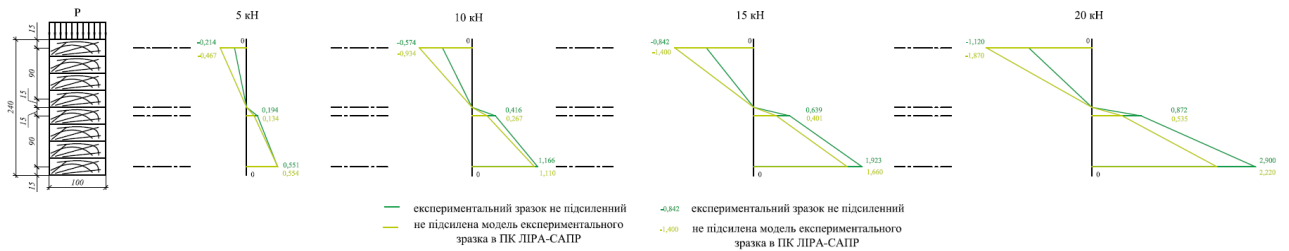
Рис. 4.12. Графік максимальних вертикальних деформацій експериментального зразка підсиленого композитними стрічками та моделі експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР підсиленого композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь дії навантаження.

Різниця максимальних вертикальних деформацій між експериментальним зразком та моделлю експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР підсилених композитними стрічками при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження становить до 4%.

Епюри максимальних повздовжніх напружень в деревині по центру прольоту при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних повздовжніх напружень в деревині по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних повздовжніх напружень в деревині по осі опори при відповідному значенні навантаження

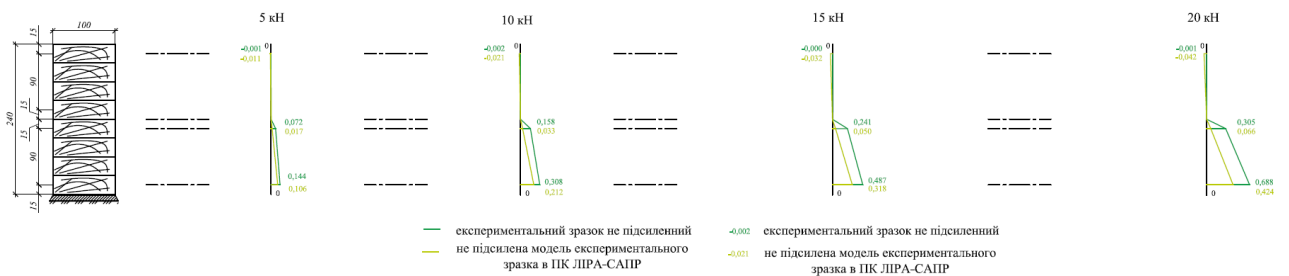
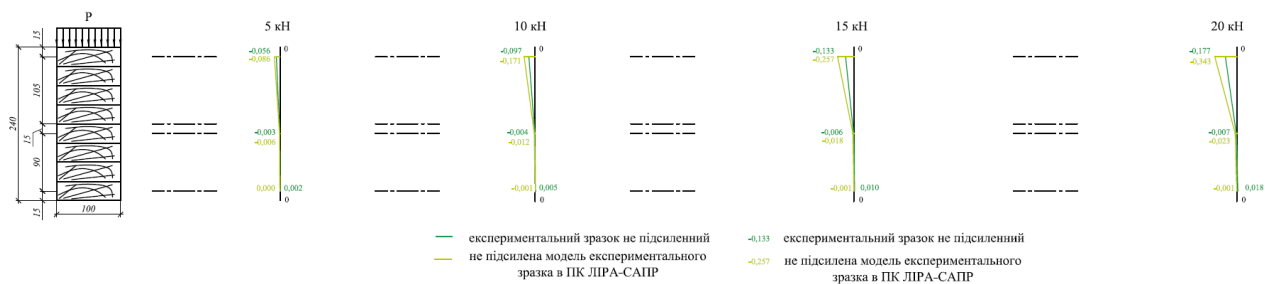


Рис. 4.13. Максимальні повздовжні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР без підсилення, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Різниця максимальних повздовжніх напружень в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР без підсилення в середині прольоту становить в стиснутій зоні до 25%, в середній зоні до 7%, в розтягнутій до 20%. Різниця максимальних повздовжніх напружень по осі дії навантаження становить в стиснутій зоні до 55%, в середній зоні до 64%, в розтягнутій до 31%.

Епюри максимальних поперечних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних поперечних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

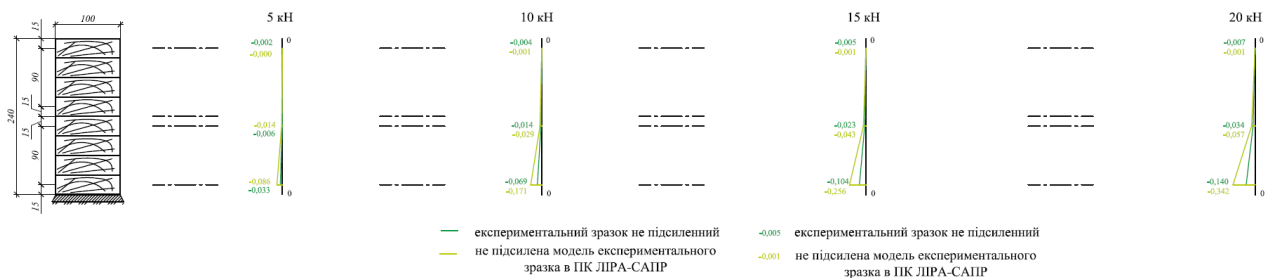
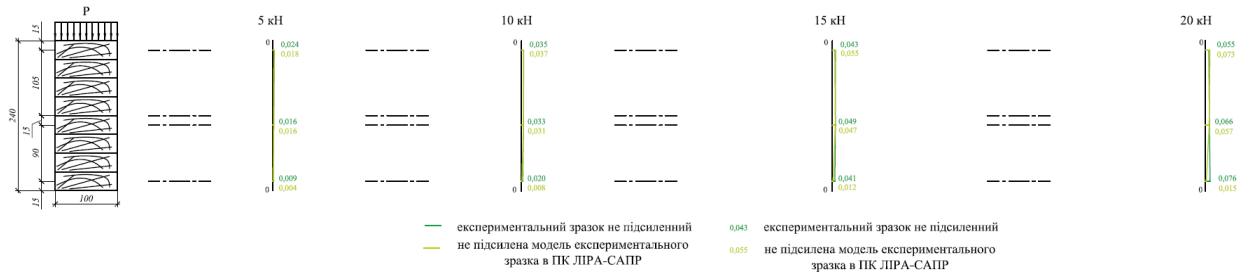


Рис. 4.15. Максимальні поперечні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР без підсилення, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Різниця максимальних поперечних напружень в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛІРА-САПР без підсилення по осі дії навантаження становить в стиснутій зоні до 49%, в середній зоні до 69%. Різниця максимальних поперечних напружень по осі опори становить в середній зоні до 58%, в розтягнутій до 62%.

Епюри максимальних дотичних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних дотичних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

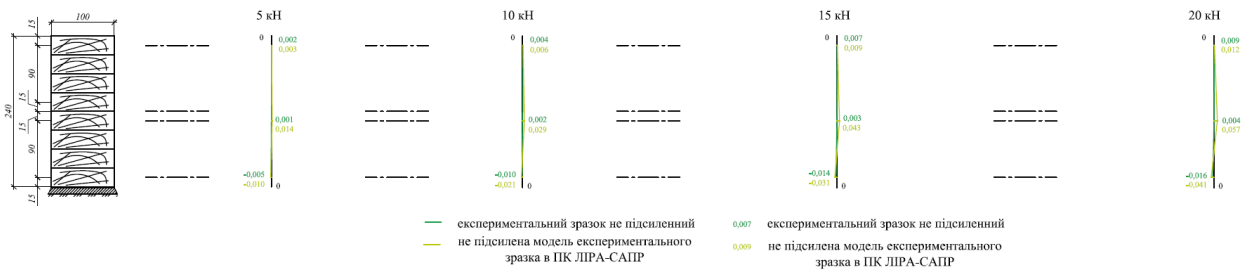
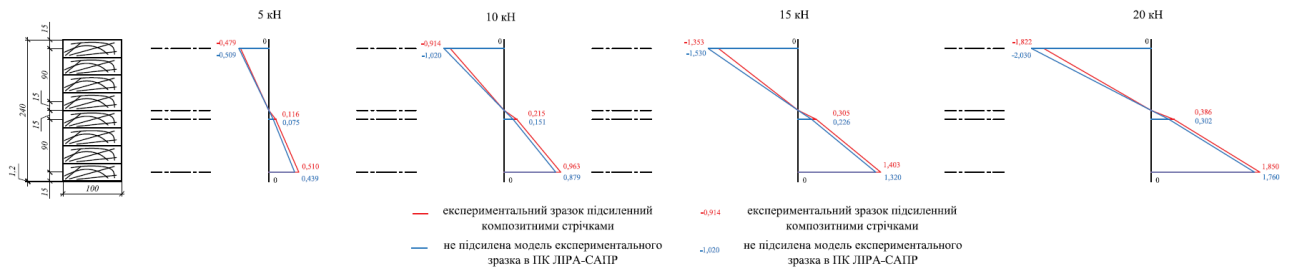


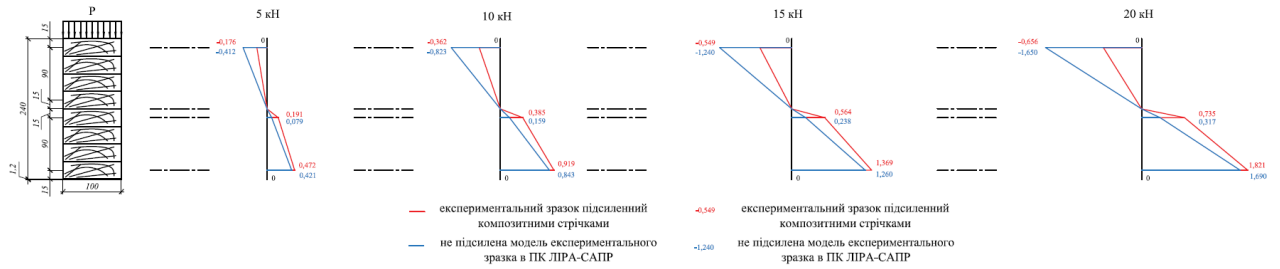
Рис. 4.16. Максимальні дотичні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПРА-САПР без підсилення, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Різниця максимальних дотичних напружень в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПРА-САПР без підсилення по осі дії навантаження становить в стиснутій зоні до 34%, в середній зоні до 7%. Різниця максимальних дотичних напружень по осі опори становить в стиснутій зоні до 25%, в розтягнутій до 63%.

Епюри максимальних повздовжніх напружень в деревині по центру прольоту при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних повздовжніх напружень в деревині по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних повздовжніх напружень в деревині по осі опори при відповідному значенні навантаження

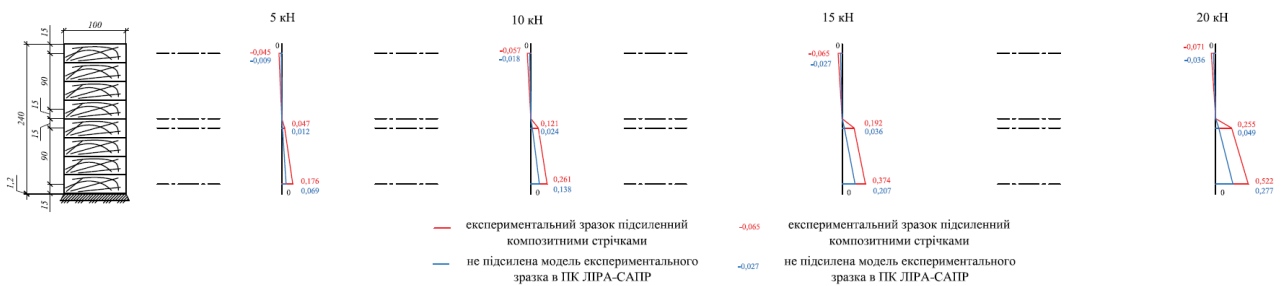
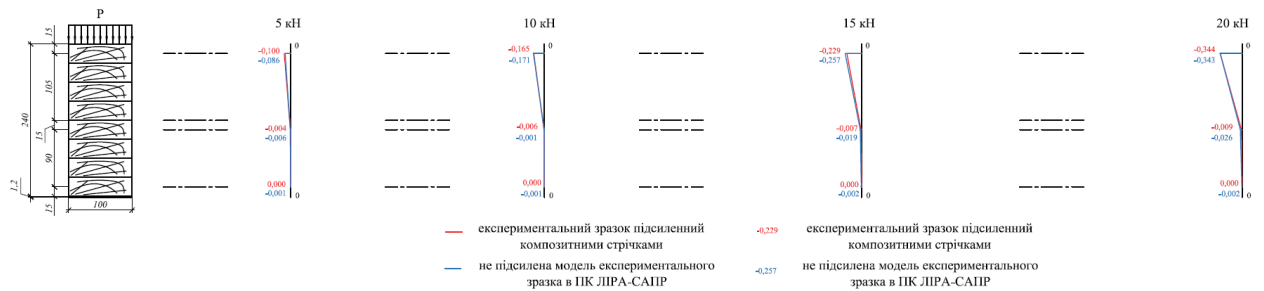


Рис. 4.17. Максимальні повздовжні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПРА-САПР підсилені композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Різниця максимальних повздовжніх напружень в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПРА-САПР підсилені композитними стрічками в середині прольоту становить в стиснутій зоні до 12%, в середній зоні до 36%, в розтягнутій до 14%. Різниця максимальних повздовжніх напружень по осі дії навантаження становить в стиснутій зоні до 61%, в середній зоні до 59%, в розтягнутій до 11%.

Епюри максимальних поперечних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних поперечних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

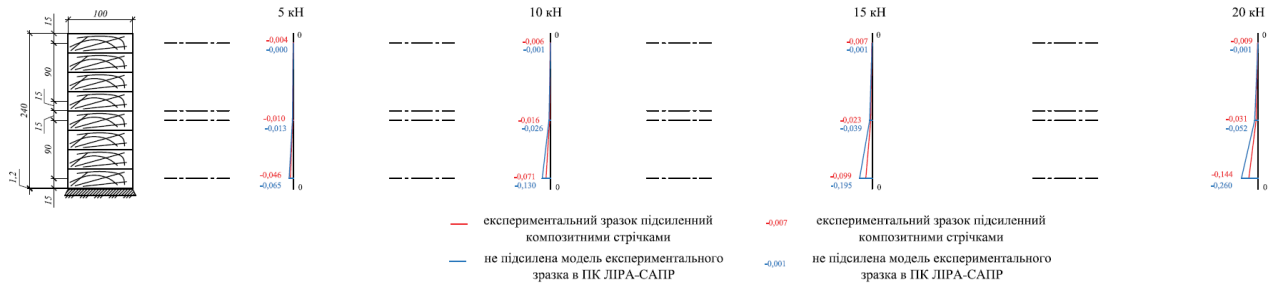
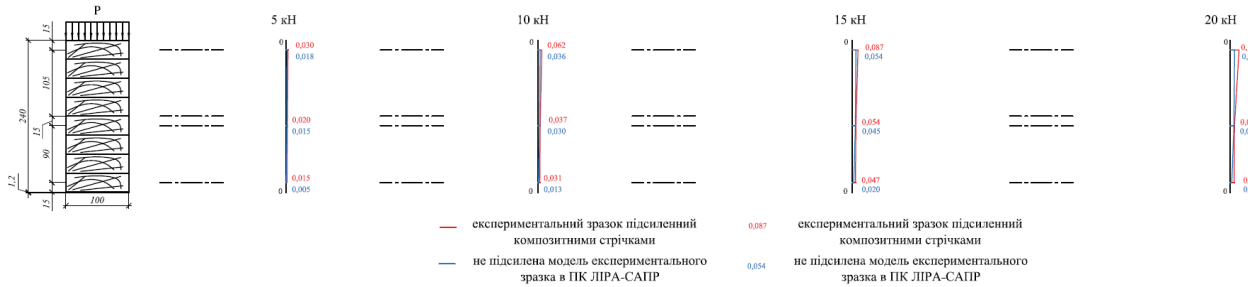


Рис. 4.18. Максимальні поперечні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПРА-САПР підсилені композитними стрічками, при значенні навантажень по 5, 10, 15, 20 кН., на одну вісь дії навантаження.

Різниця максимальних поперечних напружень в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПРА-САПР підсилені композитними стрічками по осі прикладання навантаження становить в стиснутій зоні до 15%, в середній зоні до 67%. Різниця максимальних поперечних напружень по осі опори становить в середній зоні до 40%, в розтягнутій до 50%.

Епюри максимальних дотичних напружень по осі прикладання навантаження при відповідному значенні навантаження



Епюри максимальних дотичних напружень по осі опори при відповідному значенні навантаження

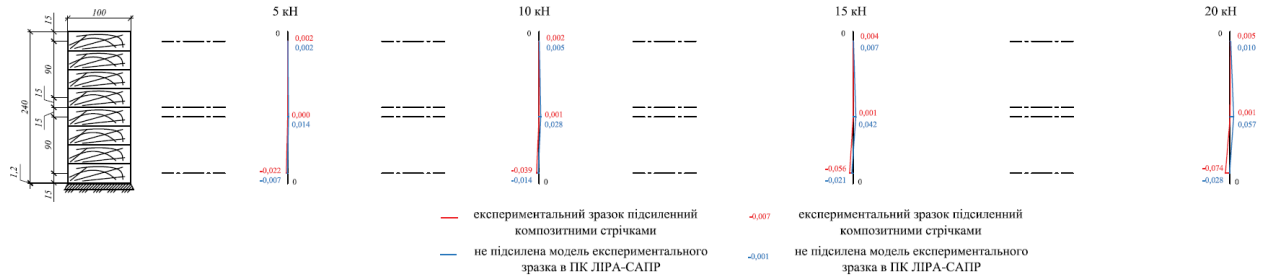


Рис. 4.19. Максимальні дотичні напруження в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПА-САПР підсилені композитними стрічками, при значенні навантажень: 5, 10, 15, 20 кН, на одну вісь прикладання навантаження.

Різниця максимальних дотичних напружень в деревині досліджуваних перерізів експериментального зразка та моделі експериментального зразка в ПК ЛПА-САПР підсилені композитними стрічками по осі прикладання навантаження становить в стиснутій зоні до 50%, в середній зоні до 23%. Різниця максимальних дотичних напружень по осі опори становить в стиснутій зоні до 51%, в розтягнутій до 68%.

Якісний характер напруженого стану деревини отриманий з числового дослідження підтверджується експериментом, загалом повздовжні напруження в розтягнутій зоні досліджуваних перерізів мають добру збіжність. Деякі відмінності в кількісних значеннях поперечних та дотичних напружень пояснюються особливостями будови деревини та наявністю факторів, які можуть суттєво впливати на її напружено-деформований стан і як наслідок міцність в цілому. Це такі фактори як нахил волокон, наявність сучків, зараження деревинним грибом будь якого виду. Електротензометрія дуже чутлива до неоднорідної будови деревини. В програмному комплексі деревина задається ідеалізованою.

4.3. Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини підсилених композитними стрічками

Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини, підсилених (армованих) композитними стрічками, полягає у застосуванні до загальних формул, для розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності, які містяться в [19] приведених характеристик до зовнішніх дошок елементів, та в визначенні зони концентрації максимальних напружень для визначення умови міцності при складному напруженому стані (СНС) [101].

Загально визнані формули для розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності:

- при згині в площині однієї осі перерізу повинна задовольнятися умова:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1; \quad (4.1)$$

- при згині за сколюванням повинна задовольнятися умова:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1; \quad (4.2)$$

- при згині за сколюванням повинна задовольнятися умова:

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} \leq 1; \quad (4.3)$$

- при центральному стиску поперек волокон повинна задовольнятися умова:

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1; \quad (4.4)$$

де: $\sigma_{m,y,d}$, τ_d , $\sigma_{t,90,d}$, $\sigma_{c,90,d}$ – розрахункові напруження згину, сколювання, розтягу та стиску поперек волокон; $f_{m,y,d}$, $f_{v,d}$, $f_{t,90,d}$, $f_{c,0,d}$ – розрахункові значення міцності згину, сколювання, розтягу та стиску поперек волокон; $k_{c,90}$ – коефіцієнт що враховує конфігурацію навантаження, можливість розколювання і ступінь стискальних деформацій.

Після забезпечення міцності при розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності, визначення зон концентрації максимальних напружень можна проводити, будь яким зручним з відомих способів. Проте найбільш ефективний є спосіб моделювання елементів в програмних комплексах об'ємними скінченними елементами для детального аналізу напружень по всьому тілу елемента.

Проведемо визначення зон концентрації максимальних напружень за допомогою ПК ЛІРА-САПР методом скінченних елементів.

Для прикладу визначення зон концентрації максимальних напружень розглянуто балки з клеєної деревини прольотами 4, 6, 8 м., підсилені композитними стрічками *Sika CarboDur S1012*. Поперечний переріз балок $b \times h = 10 \times 24$ см. Тіло балок складеться з об'ємних скінченних елементів СЕ №36 розмірами $0,01 \times 0,01 \times 0,01$ м., з відповідною жорсткістю для деревини класу міцності С30. Навантаження прикладено у вигляді лінійних сил на всю ширину поперечного перерізу моделі балки за напрямом осі Z , на відстані $\frac{1}{4}$ та $\frac{3}{4}$ прольоту, через фіктивну балку без жорсткості. Розрахунок проводився в лінійній постановці, але з врахуванням ортотропних властивостей матеріалу.

Після проведеного аналізу визначено, що зони концентрації максимальних напружень знаходиться в місцях, де найбільші максимальні поперечні напруження в деревині та відповідні їм максимальні повздовжні та дотичні напруження. Схеми балок та зони концентрації максимальних напружень наведені на рис. 4.20-4.22.

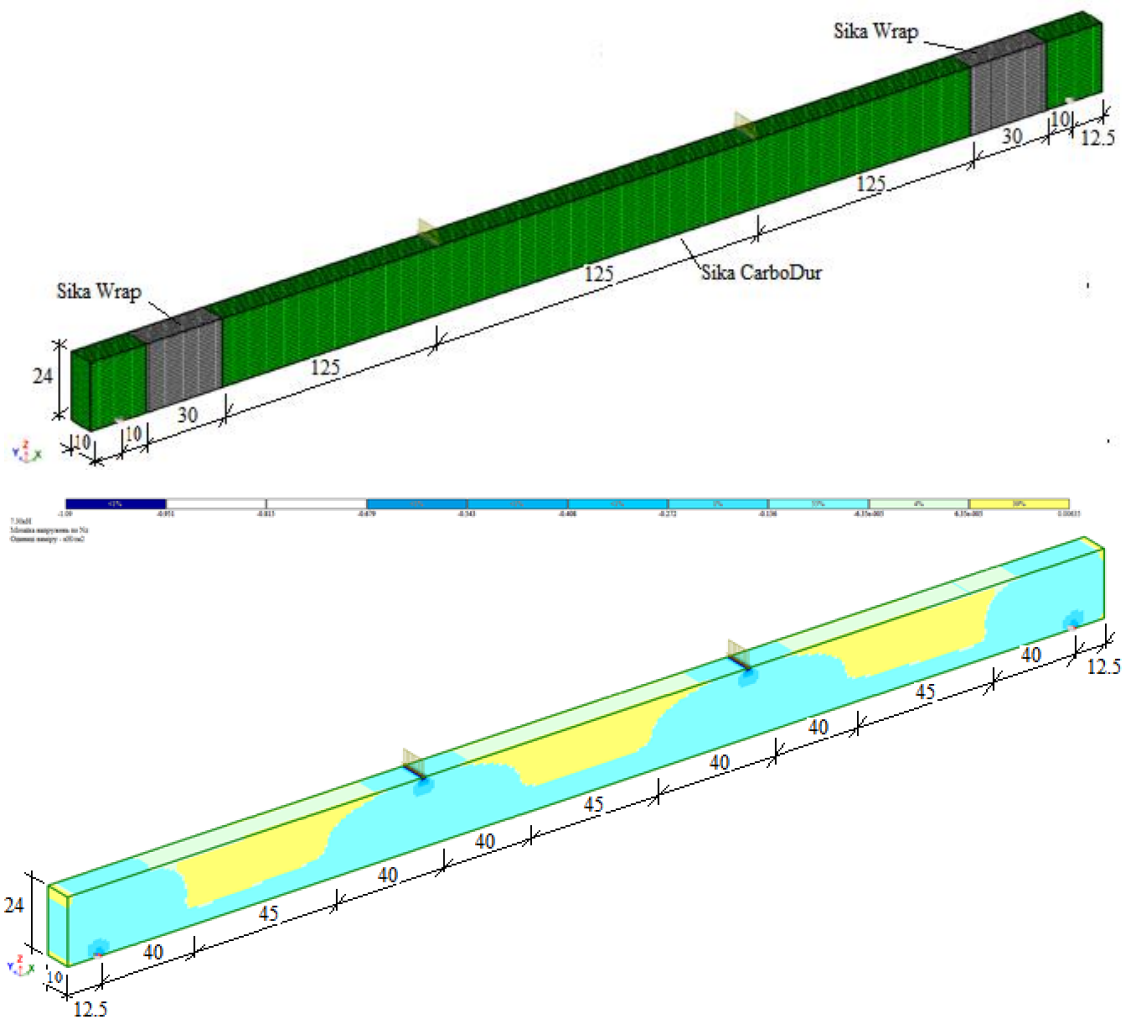


Рис. 4.20. Балка прольотом 4 м, та зони концентрації максимальних поперечних напружень напружень.

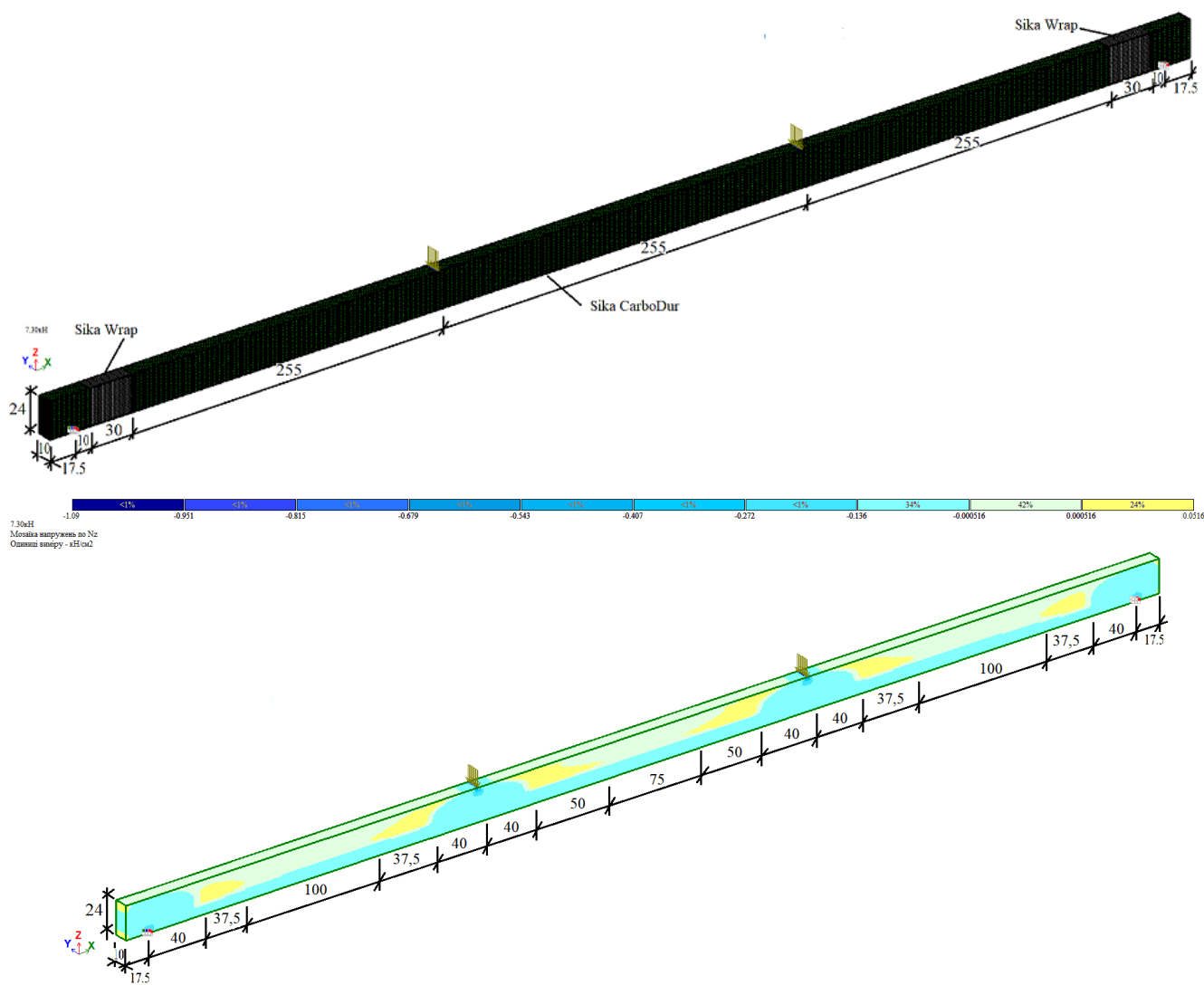


Рис. 4.22. Балка прольотом 8 м, та зони концентрації максимальних поперечних напружень.

З проведеного дослідження видно, що концентрації максимальних напружень в крайніх прольотах має загальну величину 75 см, та діляться на дві частини які в свою чергу знаходяться на відстані по 40 см, від осей опори та дії навантаження. В середньому прольоті загальна величина концентрації максимальних напружень дорівнює 100 см, та ділиться на дві рівні частини які знаходяться на відстані по 40 см, від осей дії навантаження.

Визначаємо умови міцності при СНС [101] в точці максимальної концентрації напружень, які виконуємо за формулами для відповідних комбінацій навантажень:

- (I) при дії нормальних напружень від згину (σ_m), сколюючих (τ) та напружень розтягу поперек волокон ($\sigma_{t,90}$):

$$\frac{\sigma_m^2}{(f_{m,d})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,d})^2} A_{m,t} - \frac{\sigma_m \sigma_{t,90}}{f_{m,d} f_{t,90,d}} C_{m,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,d})^2} B_{m,t} \leq 1; \quad (4.5)$$

- (II) при дії нормальних напружень від згину (σ_m), сколюючих (τ) та напружень стиску поперек волокон ($\sigma_{c,90}$):

$$\frac{\sigma_m^2}{(f_{m,d})^2} + \frac{\sigma_{c,90}^2}{(f_{c,90,d})^2} A_{m,c} - \frac{\sigma_m \sigma_{c,90}}{f_{m,d} f_{c,90,d}} C_{m,c} + \frac{\tau^2}{(f_{v,d})^2} B_{m,c} \leq 1; \quad (4.6)$$

- (III) при дії нормальних напружень від стиску (σ_c), сколюючих (τ) та напружень розтягу поперек волокон ($\sigma_{t,90}$):

$$\frac{\sigma_c^2}{(f_{c,0,d})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,d})^2} A_{c,t} - \frac{\sigma_c \sigma_{t,90}}{f_{c,0,d} f_{t,90,d}} C_{c,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,d})^2} B_{c,t} \leq 1; \quad (4.7)$$

- (IV) при дії нормальних напружень від стиску (σ_c), сколюючих (τ) та напружень стиску поперек волокон ($\sigma_{c,90}$):

$$\frac{\sigma_c^2}{(f_{c,0,d})^2} + \frac{\sigma_{c,90}^2}{(f_{c,90,d})^2} A_{c,c} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,d})^2} B_{c,c} \leq 1; \quad (4.8)$$

- (V) при дії нормальних напружень від розтягу (σ_t), сколюючих (τ) та напружень розтягу поперек волокон ($\sigma_{t,90}$):

$$\frac{\sigma_t^2}{(f_{t,0,d})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,d})^2} A_{t,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,d})^2} B_{t,t} \leq 1; \quad (4.9)$$

- (VI) при дії нормальних напружень від розтягу (σ_t), сколюючих (τ) та напружень стиску поперек волокон ($\sigma_{c,90}$):

$$\frac{\sigma_t^2}{(f_{t,0,d})^2} + \frac{\sigma_{c,90}^2}{(f_{c,90,d})^2} A_{t,c} - \frac{\sigma_t \sigma_{c,90}}{f_{t,0,d} f_{c,90,d}} C_{t,c} + \frac{\tau^2}{(f_{v,d})^2} B_{t,c} \leq 1. \quad (4.10)$$

де: σ_m - нормальні напруження від згину; σ_c - нормальні напруження стиску вздовж волокон деревини; σ_t - нормальні напруження розтягу вздовж волокон деревини; τ - дотичні (сколюючі) напруження; $\sigma_{c,90}$ - нормальні напруження стиску поперек волокон деревини; $\sigma_{t,90}$ - нормальні напруження розтягу поперек волокон деревини; $f_{m,d}$ – розрахункове значення міцності деревини від згину вздовж волокон; $f_{c,0,d}$ – розрахункове значення міцності деревини при стиску вздовж волокон; $f_{t,0,d}$ – розрахункове значення міцності деревини при розтягу вздовж волокон; $f_{v,d}$ – розрахункове значення міцності деревини при сколюванні; $f_{c,90,d}$ – розрахункове значення міцності деревини при стиску поперек волокон; $f_{t,90,d}$ – розрахункове значення міцності деревини при розтягу поперек волокон; $A_{m,t}$, $C_{m,t}$, $B_{m,t}$, $A_{m,c}$, $C_{m,c}$, $B_{m,c}$, $A_{c,t}$, $C_{c,t}$, $B_{c,t}$, $A_{c,c}$, $C_{c,c}$, $B_{c,c}$, $A_{t,t}$, $C_{t,t}$, $B_{t,t}$, $A_{t,c}$, $C_{t,c}$, $B_{t,c}$ – параметри, що враховують анізотропію фізико-механічних властивостей та початковий рівень нормальних напружень вздовж волокон (див. додаток Г).

Визначення умови міцності при СНС в точці максимальної концентрації напружень дослід жувальних балок виконуємо для максимальних поперечних напружень та відповідних для них максимальних повздовжніх та дотичних напружень за комбінацією III формула 4.7.

Для зменшення концентрації напружень в наведених зонах пропонується виконати підсилення таких зон за допомогою композитних полотен *Sika Wrap – 230 C/45* двома варіантами.

Варіант №1. Обклеювання ззовні тіла балок в зонах концентрації максимальних напружень полотнами *Sika Wrap – 230 C/45*. Алгоритм обклеювання тіла балки полотнами наведений в розділі 3.2. Схема підсилення зон концентрації максимальних напружень балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками за варіантом №1 наведена на рис. 4.23.

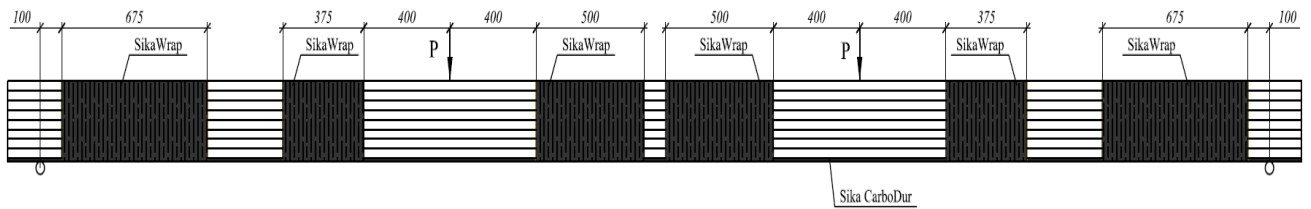


Рис. 4.23. Схема підсилення зон концентрації максимальних напружень балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками за варіантом №1.

Варіант №2. В зонах концентрації максимальних напружень виконуються пази циліндричної форми по центральній осі ширини поперечного перерізу балки під кутом 45° . У виготовлені пази вставляються змочені клеєм *Sikadur-330* та скручені в трубочки полотна *Sika Wrap - 230 C/45* утворюючи, так би мовити, композитний стержень. В даній схемі полотна *Sika Wrap - 230 C/45* обмотані навколо тіла балок в при опорних зонах для кращого анкерування стрічок *Sika CarboDur S512*.

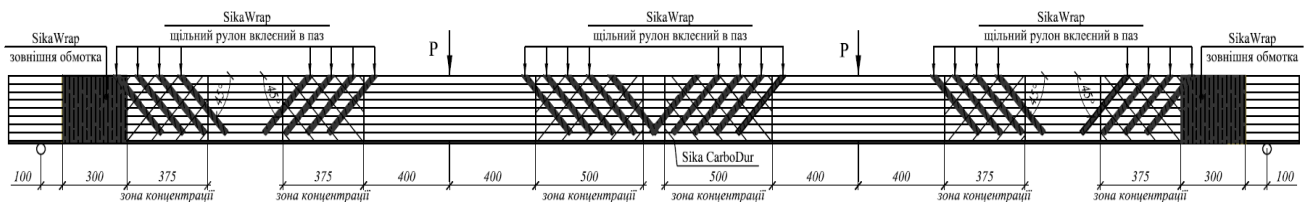


Рис. 4.23. Схема підсилення зон концентрації максимальних напружень балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками за варіантом №2.

4.4. Висновки по розділу 4.

Після розробки чисельної моделі мета, якої полягала у визначенні напружень в перерізах моделі, визначенні вертикальних деформацій та порівняння отриманих результатів, з натурними експериментальними випробуваннями можна зробити наступні висновки:

1. Моделювання експериментального зразка в середовищі ПК ЛІРА-САПР, не за ідеалізованою схемою дає кращу збіжність результатів в порівнянні з моделюванням в розділі 2.1.

2. Підсилення експериментального зразка шляхом наклеювання на розтягнуту зону композитних стрічок, зменшує вертикальні деформації на величину до 13%, що добре збігається з результатами моделювання експериментального зразка в середовищі ПК ЛІРА-САПР, де вертикальні деформації в зразках підсилених композитними стрічками зменшились на величину до 17%.

3. Якісний характер напруженого стану деревини отриманий з числового дослідження підтверджується експериментом, загалом повздовжні напруження в розтягнутій зоні досліджуваних перерізів мають гарну збіжність. Деякі відмінності в кількісних значеннях поперечних та дотичних напружень пояснюються особливостями будови деревини та наявністю факторів, які можуть суттєво впливати на її напружено-деформований стан і як наслідок міцність в цілому. Це такі фактори як нахил волокон, наявність сучків, зараження деревинним грибом будь якого виду. Електротензометрія дуже чутлива до неоднорідної будови деревини. В програмному комплексі деревина задається ідеалізованим ортотропним матеріалом.

4. Руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками, відбулось в зоні концентрації комбінації максимальних поперечних, повздовжніх та дотичних напружень, що доводить розрахунок визначення умови міцності при складному напруженому стані.

5. Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини, підсилених (армованих) композитними стрічками, полягає у застосуванні до загальних формул, для розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності, які містяться в ДБН В.2.6-161:2017 приведених характеристик до зовнішніх дошок елементів, та в визначенні зони концентрації максимальних напружень для визначення умови міцності при складному напруженому стані.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Загалом, виходячи зі зробленого в дані дисертаційній роботі, було виділено наступне:

1. Проведений аналіз сучасного стану досліджень армованих дерев'яних конструкцій довів нагальну необхідність детального вивчення таких конструкцій підсилених композитними стрічками. Практично відсутні в Україні дослідження спільної роботи композитних стрічок з дерев'яними конструкціями унеможливорює розробку інженерної методики розрахунку, що в свою чергу суттєво обмежує застосування дерев'яних конструкцій з армуванням композитними стрічками в будівельних конструкціях різноманітного призначення. У зв'язку з відсутністю у вітчизняних нормативних документах ДСТУ-Б.В.2.6-217, ДБН В.2.6-161:2017 вказівок щодо розрахунку чи будь якого іншого інженерного підходу до конструкцій з клеєної деревини, підсилених композитними стрічками є актуальним проведення і подальша перспектива даних досліджень.
2. За розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР балки з клеєних дошок класу міцності С35, що моделювались об'ємними скінченними елементами СЕ №36 підсилені композитними стрічка з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012*, що моделювались плоскими скінченними елементами СЕ №44 мають в середньому на 18% менші вертикальні деформації та на 27% менші нормальні напруження від аналогічних балок з звичайної клеєної деревини без підсилення.
3. За розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР ламано-клеєних тришарнірних рам з клеєної деревини класу міцності *GL 36h* з цілісно клеєними карнизними вузлами в яких з'єднання ригеля із стійкою реалізоване через зубчастий шип по бісектрисі кута, що моделювались плоскими скінченними елементами СЕ №44 та підсилені композитними стрічками з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S 1012*, що моделювались стержневими скінченними елементами СЕ №10, зменшують вертикальні деформації в досліджуваних рамах на 39% та на 57% зменшують максимальні нормальні напруження в розтягнутій зоні ригелів.

4. За розрахунком методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР плити з ПКД склеєні з дошок класу міцності С 24, що моделювались об'ємними скінченними елементами СЕ №36 підсилені композитними стрічка з вуглецевих волокон *Sika CarboDur S1012*, що моделювались плоскими скінченними елементами СЕ №36 мають на 20% менші вертикальні деформації та на 32% менші нормальні напруження від аналогічних плит з ПКД не підсилених композитними стрічками.
5. В дисертації створено універсальний алгоритм проведення експериментального дослідження балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками за допомогою електротензометрії.
6. Вперше наведено технологічну послідовність виконання підсилення балок з клеєної деревини композитними стрічками *Sika CarboDur S512*.
7. Встановлено, що підсилення експериментального зразка шляхом наклеювання на розтягнуту зону композитних стрічок, зменшує вертикальні деформації на величину до 13%.
8. Руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками відбулось при значенні, яке є на 63% більшим за граничне максимальне розрахункове навантаження експериментального зразка не підсиленого композитними стрічками при $k_{mod} = 1$ та на 80% більшим за максимальне розрахункове навантаження з урахуванням коефіцієнту k_{mod} прийнятим відповідно до ДБН В.2.6-161:2017.
9. За якісним характером напруженого стану деревини отриманого експериментальним дослідженням в балках з клеєної деревини та в балках з клеєної деревини підсилених композитними стрічками чітко видно, що максимальні повздовжні напруження в підсилених балках зменшились до 42%, максимальні дотичні напруження збільшились в підсилених балках до 57%, а дотичні збільшились в деяких перерізах до 79%.
10. Моделювання експериментального зразка в середовищі ПК ЛІРА-САПР, не за ідеалізованою схемою дає кращу збіжність результатів.

11. Підсилення експериментального зразка шляхом наклеювання на розтягнуту зону композитних стрічок, зменшує вертикальні деформації на величину до 13%, що добре збігається з результатами моделювання експериментального зразка в середовищі ПК ЛПА-САПР, де вертикальні деформації в зразках підсилених композитними стрічками зменшились на величину до 17%.

12. Якісний характер напруженого стану деревини отриманий з числового дослідження підтверджується експериментом, загалом повздовжні напруження в розтягнутій зоні досліджуваних перерізів мають добру збіжність. Деякі відмінності в кількісних значеннях поперечних та дотичних напружень пояснюються особливостями будови деревини та наявністю факторів, які можуть суттєво впливати на її напружено-деформований стан і як наслідок міцність в цілому. Це такі фактори як нахил волокон, наявність сучків, зараження деревинним грибом будь якого виду. Крім того визначення напружень за допомогою електротензометрії дуже чутливий до неоднорідності будови деревини, в той час як в програмному комплексі деревина задається ідеалізованим ортотропним матеріалом.

13. Руйнування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками, відбулось в зоні концентрації комбінації максимальних поперечних повздовжніх та дотичних напружень, що вказує на наявність складного напруженого стану і як наслідок вимагає його урахування під час розрахунків.

14. Запропоновано інженерну методику розрахунку елементів з клеєної деревини, підсилених (армованих) композитними стрічками, яка полягає у застосуванні до загальних формул, для розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності, які містяться в ДБН В.2.6-161:2017 приведених характеристик до зовнішніх дошок елементів, та перевірок зон концентрації комбінації максимальних повздовжніх, поперечних та дотичних напружень за умовами міцності при складному напруженому стані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михайловський, Д. В. (2011) Аналіз техніко-технологічних властивостей клеєної деревини як перспективного матеріалу для будівельних конструкцій / Д. В. Михайловський, М. С. Коваленко, Д. М. Матющенко // Чернігівський науковий часопис. Серія 2: Техніка і природа. - № 2 (2). – С. 122-127.
2. Михайловський Д. В., (2016) Світовий досвід і перспективи розвитку багатоповерхового будівництва з деревини. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - Вип. 61. - С. 270-277.
3. Михайловський Д. В. Деревина - сучасний будівельний матеріал / Д. В. Михайловський, Р. В. Заєць, А. Г. Чубарев // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; відп. ред. М. М. Осетрін. – Київ : КНУБА, 2014. – Вип. 52. – С. 256 - 264.
4. Конструкции из дерева и пластмасс Примеры расчета и конструирования: Учеб. пособие для вузов / Под ред. проф. Иванова В. А.— 3-е изд., перераб и дон — Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1981— 392 с.
5. Строительные конструкции из дерева и синтетических материалов. Проектирование и расчет. Учеб. Пособие/ И. М. Гринь, К. Е. Джан-Темиров, В. И. Гринь. – 3-е изд., перераб. И доп. – К.: Выща шк., 1990. – 221 с.
6. Михайловский Д.В., (2017). Застосування деревини та деревинних матеріалів у будівництві. Международный информационно-технический журнал Оборудование и инструмент для профессионалов (деревообработка) - №4 / 199. Харків, С. 40 - 44.
7. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве // Карунас О.А., Чернова К.В., Елькина И.И. // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и энергосбережения. Сб. науч. трудов. - Симферополь : НАПКС, 2012. - Вып. 4. - С. 320-324.
8. Кліменко В. З. (2009) Конструкції з клеєної деревини. Світовий досвід / В. З. Кліменко //Промислове будівництво та інженерні споруди. - № 1. – С. 39-43.

9. Кліменко В. З. Вітчизняний досвід впровадження в капітальному будівництві конструкцій з клеєної деревини. Здобутки і проблеми / В. З. Кліменко // Будівництво України. – 2009. -№ 5. – С. 17-21.
10. Кліменко В. З. Конструкції з клеєної деревини в балкових покриттях / В. З. Кліменко, Д. В. Михайловський // Строительные материалы и изделия. – 2011. - №2 (67). - С. 14-17.
11. Проектирование современных конструкций из клееной древесины на принципах новой концепции / В. З. Клименко, А. Я. Найчук, В. В. Фурсов, Д. В. Михайловский. - К.: Сталь, 2010. - 24 с.
12. Зятюк Ю. Ю., (2016). Операційність технології виконання робіт при підсиленні дослідних залізобетонних зразків (матеріалами фірми Sika). Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне, С. 466-475.
13. Панченко О. В. (2018) Оцінка міцності закріплення і обґрунтування способу наклеювання та анкерування композитної стрічки на бетон / О. В. Панченко, О. Д. Журавський // Будівельні конструкції. Теорія і практика : зб. наук. праць / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; відп. ред. О. Д. Журавський. - Київ : КНУБА. - Вип. 2. - С. 209-218.
14. Руднева І. (2021). Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції . Будівельні конструкції. Теорія і практика, 1(8), 32–43..
15. Bashynskyy O., Vodnarchuk T., & Peleshko M. (2018). Несуча здатність та вогнестійкість дерев'яних балок армованих зовнішньою стрічковою арматурою. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 9, 184-189.
16. 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.
17. 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.

18. ДСТУ-Б.В.2.6-217-2016 «Проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини.» // - Київ, "Укрархбудінформ" 2016. – 143 с.
19. ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції. Основні положення.» // - Київ, "Укрархбудінформ" 2017. – 125 с.
20. Технічна карта матеріалу. Ідентифікаційний номер №: 020206040010000001 Sikadur® -30. Клей, 2-х компонентний епоксидний клей для наклеювання армування. Лютий 2022, Версія 04.01, 4 с.
21. Технічна карта матеріалу. Ідентифікаційний номер №: 020206040010000004 Sikadur® -330. Тиксотропний епоксидний клей для імпрегнації конструктивних полотен SikaWrap®. Березень 2022, Версія 04.01, 4 с.
22. Технічна карта матеріалу. Ідентифікаційний номер №: 020206010010000040 Sika® CarbDur® S Стрічки з вуглецевих волокон для підсилення конструкцій - складова частина системи Sika® CarboDur® System. Березень 2018, Версія 05.01, 4с.
23. Технічна карта матеріалу. Ідентифікаційний номер №: 020206020010000025 SikaWrap® -230 C/45. Тканина з однонапрямлених вуглецевих волокон для підсилення будівельних Конструкцій, частина системи підсилення SIKA®, Лютий 2018, Версія 02.01, 4 с.
24. Проектування дерев'яних конструкцій/ В. М. Попельнух. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 207 с. – (Навч. посібник).
25. Pinchevska O. O. Lalyda Y. P., Baranova O. S., & Holovach V. M., (2020) Designing a new woodcomposite material made from logging waste. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 4/1 (106), 91-97.
26. Olena Pinchevska, Ján Sedliačik, Olexandra Zavorotnuk, Andriy Spirochkin, Ivan Hrabar, & Rostislav Oliynyk. (2021) Durability of kitchen furniture made from medium-density fibreboard (MDF). ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN, 63(1): 119–130, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene
27. Pinchevska O., & Spirochkin A. (2021) Pulse drying of red oak wood workpieces. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science, 12(2), pp. 40–49

28. Pinchevska O., Sedliačik J., Zavalov D., Lobchenko H., & Oliynyk R. (2022) Insulating wood wool panels using low-grade pine wood. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 64(1), pp. 15–24.
29. Sedliačik J., Pinchevska O., Lopatko K., & Lopatko L. (2023). Effect of magnesium nanoparticles on formaldehyde emissions from wood composite materials. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 14(3), pp. 78–90.
30. Pinchevska O., Lopatko K., Lopatko L., Oliynyk R., & Sedliačik J. (2023). The effect of metal nanoparticles on formaldehyde emission from wood based materials. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 65(2), pp. 35–43.
31. Savytskyi M., Shekhorkina S., Bordun M., Babenko M., Tsyhankova S., Spyrudonkov V., Savytskyi O., & Rabenseifer R. (2024). Design of proactive management system for residential buildings by using smart equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8 (128), 16–25.
32. Shekhorkina S., Savytskyi M., Nikiforova T., Shliakhov K., & Myslytska A. (2020). Calculation of the composite timber-reinforced-concrete bending elements considering the nonlinear work of the joint. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7 (107), 14–21.
33. Шехоркіна С. Є., Буцька О. Л., Бордун М. В., & Шляхов К. В. (2020) Напружено-деформований стан гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням деформацій повзучості. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро. № 3. С. 100-108.
34. Шехоркіна С. Є., Махінько М. М., & Мислицька А. О. (2020). Експериментальне дослідження фізико-механічних характеристик клеєної деревини. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса. № 79. С. 53-62.
35. Shekhorkina S., Shliakhov K., & Sopilniak A. (2020) Experimental investigation of load-bearing capacity and deflections of full-scale glued laminated timber beams. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Odessa. Issue 2 (61). P. 5-11.

36. Шехоркіна С. Є. (2020) Експериментальне дослідження болтового з'єднання елементів з клеєної деревини на металевих пластинах. Сучасні будівельні конструкції з металу і деревини. Одеса. № 24. С. 134-140.
37. Шехоркіна С. Є., Нікіфорова Т. Д., & Буцька О. Л. (2020). Оцінка вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних будівель. Науковий вісник будівництва. Харків. № 2 (100) С. 149-157.
38. Шехоркіна С. Є., & Савицький М. В. (2020) Компенсація нерівномірних вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпро. № 4. С. 114-118.
39. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В., & Ковтун-Горбачова Т. А. (2020) Конструктивне рішення та методика розрахунку вузлів сполучення клеєної дерев'яної балки та колони. Комунальне господарство міст. Харків. № 4 (157). С. 12-17.
40. Shekhorkina S. Yev., Adil Jabbar Abbas, & Nikiforova T. D. (2020) Investigation of the stress-strain state of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпро. № 5. С. 176-181.
41. Шехоркіна С. Є. (2020) Метод оцінювання напружено-деформованого стану деревозалізобетонної конструкції складеного перерізу. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпро. № 6. С. 156-161
42. Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою. / Сурмай М.І./ Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук // Національний університет «Львівська Політехніка» // на правах рукопису. Львів. 2015. – 185 с.
43. Атлас деревянных конструкций / К.-Г.Гётц, Д. Хоор, К. Мёлер, Ю. Наттерер. – Стройиздат, 1985. – 272 с
44. Монасевич А. Д. Составные деревянные и железо-деревянные оболочки / А. Д. Монасевич. // Вестник инженеров и техников. – 1937. – №1. – С. 12 – 17.

45. Гринь И.М. «Строительные конструкции из дерева и синтетических материалов», Киев, 1990 г. ст.78.
46. Михайловський Д., & Комар М., (2020). Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини армованої композитною арматурою. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (7), 93–100.
47. Huang X., Birman V., 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.
48. Tetrmomehanical Wu W., (1990) Properties of Fiber Reinforced Plastics (FRP) Bars. PhD dissertation, West Virginia University, Morgantown, W, Va., 292 p.
49. Kumahara S., Masuda Y. And Tanano Y., (1993) Tensile Strength of Continuous Fiber Bar under High Temperature. International Symposium on Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 731-742.
50. Yamaguchi T., Kato Y., Nishimura T., Uomoto T., (1997). Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers. Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 179 – 186.
51. Bennett R., (20 July 2000). Carbon fibre dangers compare wsth asbestos, New Civil Engineer, p.10.
52. Zhuravskyi O. D. (2020). Bearing capacity of steel-fiber-concrete slabs with biaxially prestressed reinforcement // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, – Issue 105. – P. 292-301.
53. Zhuravskyi O., Tymoshchuk V., Zhuravska N., Hajiyev M. (2020) Influence of Strengthening Flat Slab by External Prestressed Reinforcement on Deformation Characteristics of the Slab. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 181, pp. 449–456. Springer, Cham.
54. Zhuravskyi O. D., Zhuravska N. E., & Bambura A. M. (2022) Features of calculation of prefabricated steel fiber concrete airfield slabs // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, 14 (1), pp. 103–107.

55. Nianqiang Z., Weixing S., (2017). Experimental investigations of timber beams strengthened by CFRP and Rebars under bending. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 191, 012043.
56. 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.
57. Mascia N. T., Bertoline C. A. A., Baságua 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.
58. 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.
59. Kawecki, B., & Sumorek, A. (2022). Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by cfrp plate. Appl. Sci. 12, 10304.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. 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.

65. Ianasi A. C. (2015). On the role of cfrp reinforcement for wood beams stiffness. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95.

66. 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.

67. 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 .

68. Wdowiak-Postulak A. (2022). Strengthening of Structural Flexural Glued Laminated Beams of Ashlar with Cords and Carbon Laminates. *Materials*, 15 (23), 8303.

69. Михайловський Д., & Комар М. (2021). Армування конструкцій з деревини композитними матеріалами, стан і перспективи. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (9), 72–80.

70. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів. *Навчальний посібник*. – Чернігів: ЧДТУ, 2007. – 288 с.

71. Кузьмінець М. П., Максим'юк Ю. В., & Мартинюк І. Ю. (2023) дослідження напружено-деформованого стану призматичного демпферувального елемента. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. (1) №102. С 73-77.

72. Maksimyyuk Yu. V., Martyniuk I. Yu., Kozak O. V., & Maksimyyuk O. V. (2023). Numerical analysis of the stressed-deformed state of a tubular element under thermal loading. *Strength of Materials and Theory of Structures – Kyiv: KNUBA*, – Issue 110. – С. 199-206.

73. Maksimyyuk Yu. V, Kuzminets M. P., Martyniuk I. Yu., & Maksimyyuk O. V. (2022). Research of the stressed and deformed state of metal strip in the broaching process. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles*. – Kyiv: KNUBA. – Issue 109. – С.229-238.

74. Максим'юк Ю., Шкриль, О., Мартинюк І., & Бучко, В. (2021). Вузлові реакції та коефіцієнти матриці жорсткості скінченого елемента на основі представлення переміщень поліномами. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (9), 54–62.
75. Vorona Y. V., Maksimiyuk Yu. V., Martyniuk I. Yu., & Maksimiyuk O. V. (2021). Reliability of results obtained by semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters. Strength of Materials and Theory of Structures: scientific-technical. team – Kyiv: KNUBA. - Issue. 107. – S. 184-192.
76. Іванченко Г., Максим'юк Ю., Козак А., & Мартинюк І. (2021). Побудова розв'язувальних рівнянь напіваналітичного методу скінчених елементів для призматичних тіл складної форми. Управління розвитком складних систем, (46), 55–62.
77. Максим'юк Ю., Козак А., Мартинюк І., & Максим'юк О. (2021). Особливості виведення формул для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченого елемента з усередненими механічними і геометричними параметрами. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 1(8), 97–108.
78. Maksymiuk Y., Goncharenko M., Martyniuk I., & Maksymiuk O. (2020). Алгоритм розв'язання системи лінійних та нелінійних рівнянь напіваналітичним методом скінчених елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (7), 101–108.
79. ЛИРА–САПР. Книга І. Основы. Е. Б Стрелец–Стрелецкий, А. В. Журавлев, Р. Ю. Водопьянов. Под ред. Академика РААСН, докт. техн. наук, проф. А.С. Городецкого. – Издательство LIRALAND, 2019.– 154 с.
80. Программный комплекс ЛИРА-САПР®. Руководство пользователя. Обучающие примеры Ромашкина М. А., Титок В. П. Под редакцией академика РААСН Городецкого А. С. Электронное издание, 2018г. – 254 с. с.
81. Программный комплекс ЛИРА-САПР®. Руководство пользователя. Обучающие примеры. Водопьянов Р. Ю., Титок В. П., Артамонова А. Е, Ромашкина М. А. Под редакцией академика РААСН Городецкого А. С. Электронное издание, 2017г., – 535 с.

82. Mykhaylovskiy D., & Komar M., (2022). Analysis of the stress-strain state of laminated timber beams reinforced with composite tapes. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 90-97.
83. Михайловський Д. В., Матющенко Д. М., (2012) Еволюція карнизних вузлів рам з клеєної деревини. *Строительные материалы и изделия. Всеукраинский научно-технический и производственный журнал. № 3 (74).* – С. 27–29.
84. Михайловський, Д. В., Матющенко Д. М., (2012). Експериментальні та чисельні дослідження гнutoклеєних рам з клеєної деревини. *Чернігівський науковий часопис. № 1 (3).* –С. 92–99.
85. Михайловський Д. В., Матющенко Д. М., (2015) Напружений стан гнutoклеєних рам з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей клеєної деревини. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. Вып. 81.* - С. 124-129.
86. Михайловський Д.В., Матющенко Д.М. (2016). Чисельні дослідження експериментальних рам типу ДГРП за допомогою методу скінчених елементів. *Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково – виробничий збірник.* – Одеса – Вип. 2(49). – с.14 – 23.
87. Михайловський Д.В., Матющенко Д.М., (2018) Методика створення розрахункової схеми гнutoклеєних рам за допомогою методу скінчених елементів. *Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць / Відповід. ред. О.Д. Журавський.* – К., КНУБА – Вип. 2. – 222 с. - С. 99-107.
88. Михайловський Д.В., Матющенко Д.М. (2018). Практичні рекомендації по розрахунку карнизних вузлів гнutoклеєних рам з клеєної деревини з врахуванням складного напруженого стану. *Scientific Journal "ScienceRise" Volume 12 (53) Technical Science*, С. 44 - 53.
89. Михайловський Д., & Комар М., (2022). Аналіз напружено-деформованого стану рам з клеєної деревини підсилених композитними стрічками. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (11), 53–60.

90. Михайловський Д.В., & Комар А.А. (2018). Перехресно клеєдоцяті панелі та методи їх розрахунку // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць / Відповід. ред. О.Д. Журавський. – К., КНУБА, Вип. 2. – 222 с. - С. 146-153.
91. Михайловський Д. В., & Комар А. А., (2019) Аналіз існуючих методик розрахунку панелей з перехресно-клеєної деревини за другим граничним станом. Будівельні конструкції, теорія і практика №5 КНУБА, ISSN: 2522-4182 - С. 24 - 31.
92. Denys Mykhailovskyi (2021). Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber. Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, Вип. 107. – С. 75-88.
93. Михайловський Д. В. Розрахунок панельних будинків з поперечно-клеєної деревини: Монографія. – Київ: Каравела, 2022. – 220 с.
94. Бідаков А. М., Распопов Є. А., & Страшко Б. О., (2020). Розрахунок міцності ПКД панелей при згині з урахуванням деформацій зсуву/ Збірник наукових праць. Науковий вісник будівництва. Том 99 № 1 - Харківський національний університет будівництва та архітектури, 28-34 с.
95. Бідаков А. М., Распопов Є. А., & Страшко Б. О. (2020). Розрахунок міцності ПКД панелей при згині з урахуванням деформацій зсуву. Збірник наукових праць. Науковий вісник будівництва. Том 99 № 1 - Харківський національний університет будівництва та архітектури. 28-34 с.
96. Бідаков А. М., Распопов Є. А., Пустовойтова О. М. & Страшко Б. О. (2020). Особливості метода зсувної аналогії для розрахунку міцності ПКД панелей при згині. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, Вип. № 2 березень . – Дніпро: ДВНЗ ПДАБА,. С 10-16.
97. Бідаков А. М., Распопов Є. А., Пустовойтова О. М., & Страшко Б. О. (2020). Вплив технології виробництва пкд панелей на їх показники міцності та жорсткості. Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура» Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова – Випуск 154. С 165-172.
98. Бідаков А. М., Распопов Є. А., Пустовойтова О. М., & Страшко Б. О., Міцність деревини за умови роликового зсуву. Наукове видання Вісник

харківського національного автомобільно-дорожнього університету Збірник наукових праць - Харківський національний автомобільно-дорожній університет - Випуск № 89. С 82-89.

99. ДСТУ EN 408:2007 Лісоматеріали конструкційні. Конструкційна та клеєна шарувата деревина. Визначення деяких фізичних та механічних властивостей (EN 408:2003, IDT).

100. A.Baier Method Statement SikaWrap® Manual dry Application «Sika Services AG» N°: 850 41 02 June 2011, 19p.

101. Врахування дійсного напружено-деформованого стану у вузлах та елементах конструкцій з клеєної деревини. / Михайловський Д. В./ Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук // Київський національний університет будівництва і архітектури// на правах рукопису. Київ. 2020. – 420 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Протокол проведення експериментальних випробувань для визначення модуля пружності деревини випробувальних зразків

	Сосна 1	Сосна 2	Сосна 3	Сосна 4
Навантаження	Прогини			
P , кН	w_1 , см	w_2 , см	w_3 , см	w_4 , см
0	0	0	0	0
0,1	0,043	0,045	0,042	0,036
0,2	0,082	0,085	0,08	0,075
0,3	0,124	0,126	0,118	0,112
0,4	0,164	0,166	0,155	0,148
0,5	0,205	0,206	0,193	0,187
0,6	0,244	0,243	0,229	0,221
0,7	0,285	0,283	0,268	0,258
0,8	0,324	0,321	0,304	0,294
0,9	0,367	0,362	0,342	0,33

Протокол проведення експериментальних випробувань для визначення характеристичних значень міцності деревини на згин шляхом руйнування зразка

Руйнівне навантаження	Сосна 1	Сосна 2	Сосна 3	Сосна 4
P_{max} , кН	3	3,3	3	3,5

Геометричні параметри та фізичні властивості деревини для
експериментального зразка

Найменування деревини	Поперечни й переріз $b \times h$, см	Довжин, см	Маса, кг	Густина, кг/м ³	Вологість, %
Сосна	10 x 24	400	48	500	8,8

Фізико-механічні характеристики композитної стрічки [22]

Назва характеристики	Одиниця виміру	<i>Sika® CarboDur® S-512</i>
Ширина	мм	50
Товщина	мм	1,2
Площа перерізу	мм ²	60
Модуль пружності	МПа	160 000- 165 000
Щільність	г/см ³	1,6
Термостабільність	°С	>150
Вміст волокон	%	>68
Міцність на розтяг	МПа	2800-3100
Деформація руйнування (мінімальне значення)	%	>1,70

Фізико-механічні характеристики композитного полотна [23]

Назва характеристики	Одиниця виміру	<i>SikaWrap</i> [®] -230 C/45
Ширина тканини	мм	300
Вага тканини	г/м ²	230 ± 10
Проектна товщина тканини	мм	0,131
Товщина ламінату	мм	1
Щільність волокон	г/см ³	1,76
Міцність на розтяг волокон	МПа	4 300
Модуль пружності волокон	МПа	238 000
Деформація руйнування волокон	%	1,8
Руйнівне навантаження на 1м ширини ламінату	кН	350
Модуль пружності ламінату	МПа	28 000
Деформації руйнування ламінату (<i>max</i>)	%	0,6
Міцність на розтяг ламінату при деформації розтягу 0,4%	кН/м	100
Міцність на розтяг ламінату при деформації розтягу 0,6%	кН/м	150

Фізико-механічні характеристики клеїв [20-21]

Назва характеристики	Одиниця виміру	<i>Sikadur</i> [®] -30	<i>Sikadur</i> [®] -330
Хімічна основа	-	Епоксидна смола	Епоксидна смола
Щільність, при +23°C	кг/л	1,65 ± 0,1	1,3 ± 0,1
Стисливість, при +15°C на 15 кг	мм	4000	-
Максимальна товщина шару	мм	30	-
Усадка	%	0,04	-
Коефіцієнт температурного розширення	-	2,5 x 10 ⁻⁵ на °C	2,5 x 10 ⁻⁵ на °C
Час твердіння, при > +23°C	днів	7	7
Міцність на стиск	МПа	70-95	-
Міцність на зріз, при > +23°C	МПа	18	-
Міцність на розтяг	МПа	24-31	30
Модуль пружності при стиску, при при > +23°C	МПа	9 600	-
Модуль пружності при розтягу, при при > +23°C	МПа	11 200	4 500
Модуль пружності при згині, при при > +23°C	МПа	-	3 800

Час життя клею *Sikadur*[®]-330 [21]

Температура	+10°C	+35°C
Час життя	90 хвилин (5 кг)	30 хвилин (5 кг)
Відкритий час	60 хвилин	30 хвилин

Час пошарової витримки між покриттями попереднього клею *Sikadur*[®]-330 [21] та наступного шару клею

Температура основи	Витримка <i>min</i>	Витримка <i>max</i>
+10°C	24 години	7 діб
+23°C	12 години	
+35°C	6 години	

Температура твердіння клею *Sikadur*[®]-330 [21]

Температура	Повне твердіння
+10°C	7 діб
+23°C	5 діб
+35°C	2 доби

Час життя клею *Sikadur*[®]-30 [20]

Температура	+8°C	+20°C	+35°C
Час життя	~ 120 хвилин	~ 90 хвилин	~ 20 хвилин
Відкритий час	~ 150 хвилин	~ 110 хвилин	~ 50 хвилин

Показники тензOMETричних пристроїв за результатами проведення
експериментальних випробувань

Випробування експериментального зразка без підсилення

№ показника СИИТ	№ тензорезистора	Відлік при 0 кН	Відлік при 5 кН	Відлік при 10 кН	Відлік при 15 кН	Відлік при 20 кН
		Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
0	1	0344	0406	0477	0553	0638
1	2	-2860	-3268	-3727	-4164	-4620
2	3	-0980	-1169	-1378	-1570	-1762
3	4	0042	0071	0106	0140	0167
4	5	-0299	-0383	-0489	-0610	-0752
5	6	-0552	-0577	-0610	-0648	-0702
6	7	0132	0132	0132	0133	0133
7	8	-0499	-0519	-0540	-0559	-0581
8	9	-0295	-0298	-0302	-0303	-0306
9	10	2488	2702	2941	3235	3614
10	11	-0225	-0301	-0387	-0473	-0560
11	12	0102	0142	0184	0225	0262
12	13	0513	0589	0676	0763	0854
13	14	0721	0653	0592	0535	0473
14	15	-0061	-0106	-0146	-0181	-0221
15	16	0645	0572	0459	0342	0242
16	17	-1077	-1692	-2107	-2471	-2935
17	18	-1004	-1424	-1722	-1985	-2305
18	19	0480	0657	0865	1070	1272
19	20	0044	0092	0150	0207	0264
20	21	0290	0124	-0073	-0267	-0455

Показники тензометричних пристроїв за результатами проведення
експериментальних випробувань

Випробування експериментального зразка підсиленого композитними стрічками

№ показника СИИТ	№ тензорезистора	Відлік при 0 кН	Відлік при 5 кН	Відлік при 10 кН	Відлік при 15 кН	Відлік при 20 кН	Відлік при 25 кН
		Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
0	1	0314	0391	0429	0478	0544	0642
1	2	-1960	-2528	-2835	-3189	-3734	-4457
2	3	-0585	-0899	-1086	-1292	-1586	-1968
3	4	0009	0029	0059	0088	0114	0138
4	5	-0148	-0271	-0360	-0456	-0562	-0676
5	6	-0401	-0451	-0478	-0512	-0553	-0601
6	7	0131	0114	0110	0107	0105	0103
7	8	-0468	-0501	-0522	-0540	-0558	-0577
8	9	-0242	-0262	-0272	-0277	-0284	-0290
9	10	0268	0452	0626	0801	0977	1157
10	11	-0125	-0215	-0299	-0382	-0470	-0560
11	12	3886	3885	3880	3877	3871	3863
12	13	0452	0527	0603	0673	0740	0790
13	14	0424	0345	0286	0234	0187	0140
14	15	0003	-0060	-0106	-0150	-0189	-0227
15	16	0592	0542	0482	0421	0401	0391
16	17	-1258	-2395	-3120	-3832	-5155	-7445
17	18	-1200	-1888	-2378	-2845	-3687	-5135
18	19	0395	0592	0767	0937	01110	1281
19	20	0017	0062	0100	0135	0166	0194
20	21	0338	0153	-0015	-0185	-0366	-0552

Значення коефіцієнтів для розрахунку елементів при складному напруженому стані

Комбінації напружень	$A_{m,t}$	$A_{m,c}$	$A_{c,t}$	$A_{c,c}$	$A_{t,t}$	$A_{t,c}$	$C_{m,t}$	$C_{m,c}$	$C_{c,t}$	$C_{t,c}$	$B_{m,t}$	$B_{m,c}$	$B_{t,t}$	$B_{t,c}$	$B_{c,t}$	$B_{c,c}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
для деревини класів міцності C27, C30, C35, C40, C45, C50, GL24, GL28, GL32, GL36																
згину - $\sigma_{m,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	1,50	-	-	-	-	-	-	1,30	-	-	1,15	-	-	-	-	-
згину - $\sigma_{m,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	1,50	-	-	-	-	1,50	-	-	-	-	1,10	-	-	-	-
розтягу вздовж волокон - $\sigma_{t,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	-	-	-	-	-	1,55	-	-	-	1,30	-	-	-	1,14	-	-
розтягу вздовж волокон - $\sigma_{t,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	-	-	-	1,19	-	-	-
стиску вздовж волокон - $\sigma_{c,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	-	-	-	1,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09
стиску вздовж волокон - $\sigma_{c,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	-	1,50	-	-	-	-	-	1,50	-	-	-	-	-	1,09	-

Продовження додатку Г

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
для деревини класів міцності С14, С16, С18, С20, С22, С24																
згину - $\sigma_{m,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	1,50	-	-	-	-	-	-	1,30	-	-	1,10	-	-	-	-	-
згину - $\sigma_{m,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	1,50	-	-	-	-	1,50	-	-	-	-	1,05	-	-	-	-
розтягу вздовж волокон - $\sigma_{t,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	-	-	-	-	-	1,50	-	-	-	1,30	-	-	-	1,14	-	-
розтягу вздовж волокон - $\sigma_{t,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	-	-	-	1,50	-	-	-	-	-	-	-	1,18	-	-	-
стиску вздовж волокон - $\sigma_{c,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	-	-	-	1,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09
стиску вздовж волокон - $\sigma_{c,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	-	1,50	-	-	-	-	-	1,50	-	-	-	-	-	1,10	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
для деревини класів міцності D30, D35, D40, D50, D60, D70																
згину - $\sigma_{m,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	1,50	-	-	-	-	-	-	-	1,30	-	-	1,15	-	-	-	-
згину - $\sigma_{m,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	1,50	-	-	-	-	1,50	-	-	-	-	1,10	-	-	-	-
розтягу вздовж волокон - $\sigma_{t,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	-	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	-	-	-	1,14	-	-
розтягу вздовж волокон - $\sigma_{t,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	-	-	-	1,19	-	-	-
стиску вздовж волокон - $\sigma_{c,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень стиску поперек волокон - $\sigma_{c,90,d}$	-	-	-	1,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09
стиску вздовж волокон - $\sigma_{c,0,d}$; дотичних - $\tau_{v,0,d}$; напружень розтягу поперек волокон - $\sigma_{t,90,d}$	-	-	1,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09	-