

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 підсилених композитними матеріалами;
- досліджено 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;
- проведено експериментальне дослідження напружено-деформованого стану балок з клеєної деревини підсилених композитними стрічками;
- удосконалено методику розрахунку елементів з клеєної та перехресно-клеєної деревини підсилених 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 унеможливорює 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 підсилени 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) підсилени 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 збільшились в підсилених балках до 57%, а дотичні напруження збільшились 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 зменшились 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 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. 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 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 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 $k_{\text{mod}} = 1$ 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.