

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівництва та експлуатації будівель, доріг та
транспортних споруд

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
будівництва та експлуатації
будівель, доріг та
транспортних споруд
_____ О.С. Савченко

«___» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: «Вплив армування дерев'яних конструкцій на
напруження, що виникають в матеріалі»

Виконав (ла)

(підпис)

І.С. Попов

(Прізвище, ініціали)

Група

Науковий керівник

(підпис)

О.С. Савченко

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівництва та експлуатації будівель, доріг та транспортних споруд

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ігор Сергійович Попов

Тема роботи: Вплив армування дерев'яних конструкцій на напруження, що виникають в матеріалі

Затверджено наказом по університету № 34/ос від 07.01.2025р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "15" грудня 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

Завдання на проектування, методи дослідження

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Анотація, актуальність дослідження, мета роботи, задачі, об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна і практична значимість, огляд досліджень (матеріали, застосування, проектування, контроль якості склетовання на місці, перспективи та рекомендації), Особливості на-

пружено-деформованого стану клеєних дерев'яних балок, армованих склопластиковою арматурою, висновки.

5. Перелік графічного та або мультимедійного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Титульна сторінка, мета роботи, задачі, об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна і практична значимість, властивості волокон та полімерів, конфігурація випробування блоку на зсув, випробування на зсув в одному врізаному з'єднанні, показники міцності для модифікованих критеріїв Цай-Бу за методом Пака-Кнауста для композиту, припущення аналізу підсиленних дерев'яних елементів, режим відмови 1 і 2, напрямки головних осей в дерев'яному елементі, характеристики деревини і композитів, що використовуються при розрахунку, розрахункова схема, ізополя напружень і деформацій, графік залежності прогинів від навантаження, висновки

Керівник :

(підпис)

О.С. Савченко

(Прізвище, ініціали)

Консультант

(підпис)

О.С. Савченко

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

І.С. Попов

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Попов Ігор Сергійович. Вплив армування дерев'яних конструкцій на напруження, що виникають в матеріалі – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляд досліджень за обраною темою, розділів основної частини, висновки за результатами МКР.

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Результати досліджень дозволяють на основі математичного моделювання дерев'яних елементів, армованих склопластиковою арматурою, отримати уявлення про їх напружено-деформований стан при різному розташуванні армуючих елементів в перерізі конструкції.

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що полімерні композитні матеріали успішно застосовують для підсилення будівельних конструкцій. Досвід показує, що спільно з деревиною найбільш ефективно композити працюють при посиленні елементів, що зазнають згин.

В основній частині виконано опис кінцевоелементної моделі дерев'яної балки при її дослідженні, описано методику врахування і моделювання елементів, що моделюють синтетичні армувальні матеріали, сформульовано алгоритм числового експерименту, виконано числовий експеримент, побудовано графіки залежності прогинів від навантаження для балок без підсилення і балок з різним розташуванням армуючих елементів.

У **висновках** встановлено, що жорсткість дослідної балки, посиленою полімерними композитами, збільшувалася приблизно на 20%, а несуча здатність більш ніж на 35%.

Ключові слова: дерев'яні конструкції, міцність, синтетичні матеріали, склопластикова арматура, напружено-деформований стан.

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

1. Попов І. Вплив армування дерев'яних конструкцій на напруження, що виникають в матеріалі: техніко-економічний аспект. Матеріали 87-ї Міжнародної наукової конференції студентів університету, 7–11 квіт. 2025 р. Харків, 2025.
2. Савченко О.С., Савченко Л.Г., Попов І. Техніко-економічні особливості напружено-деформованого стану клеєних дерев'яних балок, армованих склопластиковою арматурою // Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції, 26 листопада 2025 р. Харків, 2025. С.43.

В **додатках** наведено; тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 69 сторінках, у тому числі 5 таблиць, 27 рисунків. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, 3 розділи, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з 80 використаних джерел, 3 додатків на 18 сторінках. Графічна частина складається з 14 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Igor Popov. The influence of reinforcement of wooden structures on the stresses arising in the material – Master's qualification work on manuscript rights.

Master's qualification work in specialty 192 "Construction and civil engineering". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The work consists of the content, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the selected topic, sections of the main part, conclusions based on the results of the MQW.

The goal, tasks, object and subject of research, methods of scientific research are formulated.

The results of the research allow, based on mathematical modeling of wooden elements reinforced with fiberglass reinforcement, to obtain an idea of their stress-strain state with different arrangements of reinforcing elements in the cross-section of the structure.

Analysis of publications and research has established that polymer composite materials are successfully used to strengthen building structures. Experience shows that, together with wood, composites work most effectively in strengthening elements that undergo bending.

The **main part** describes the finite element model of a wooden beam during its study, describes the method of taking into account and modeling elements that model synthetic reinforcing materials, formulates the algorithm of a numerical experiment, performs a numerical experiment, and plots the dependence of deflections on the load for beams without reinforcement and beams with different arrangements of reinforcing elements.

The **conclusions** found that the stiffness of the experimental beam reinforced with polymer composites increased by approximately 20%, and the load-bearing capacity by more than 35%.

Key words: wooden structures, strength, synthetic materials, fiberglass reinforcement, stress-strain state.

A list of the student's publications and/or speeches at conferences:

1. Popov I. The influence of reinforcement of wooden structures on stresses arising in the material: a technical and economic aspect. Proceedings of the 87th International Scientific Conference of University Students, April 7–11, 2025. Kharkiv, 2025.
2. Savchenko O.S., Savchenko L.G., Popov I. Technical and economic features of the stress-strain state of glued wooden beams reinforced with fiberglass reinforcement // Proceedings of the 19th International Scientific and Practical Conference, November 26, 2025. Kharkiv, 2025. P.43.

In the **appendices** are given; abstracts of the conference, an album of multimedia presentation slides.

Structure of work. The work consists of the main text on 69 pages, including 5 tables, 27 figures. The text of the work contains a general description of the work, 3 chapters, conclusions and recommendations based on the results of the work, a list of 80 used sources, 3 appendices on 18 pages. The graphic part consists of 14 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

Зміст.....	8
Розділ 1. Вступ	10
Розділ 2. Огляд досліджень.....	11
2.1. Матеріали.....	13
2.1.1. Композитні армуючі матеріали	13
2.1.2. Клеї	14
2.1.3. Зчеплення між поверхнею композиту та деревиною.....	16
2.1.4. Пошкодження та розшарування композитів під навантаженням	19
2.1.5. Пошкодження композиту внаслідок вогню	24
2.2. Застосування.....	25
2.2.1. Армування торців балки.....	25
2.2.2. Розтягнута арматура, перпендикулярна до волокон	27
2.2.3. Арматура на згинання.....	29
2.2.4. Арматура на зсув.....	30
2.2.5. Попередньо напружений композит.....	33
2.3. Проектування.....	37
2.3.1. Підсилення елементів, які працюють на згин.....	37
2.3.2. Зміцнення на зсув.....	43
2.3.3. Тривалі деформації деревини та композитів	46
2.4. Контроль якості склеювання на місці.....	50
2.5. Перспективи та рекомендації	51
Розділ 3. Особливості напружено-деформованого стану клеєних дерев'яних балок, армованих склопластиковою арматурою.....	53

Розділ 4. Висновки	67
Література	68

РОЗДІЛ 1. ВСТУП

Зростання темпів індивідуального будівництва піднімає питання раціонального використання матеріалів, скорочення собівартості і підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій. Найбільш популярним матеріалом, як для опорядження приміщень, так і зведення несучих елементів будинків і інших споруд є деревина, яка має низку незаперечних переваг. Використання деревини, як екологічного матеріалу, при скороченні матеріалоємності та збереженні міцності елементів дерев'яних конструкцій є актуальним завданням.

Клеєні дерев'яні конструкції знаходять застосування як в традиційному малоповерховому житловому будівництві, так і в будівництві великопроектних громадських будівель, включаючи спорткомплекси, басейни, аквапарки, тваринницьких комплексів, теплиць, мостів, комплексів для зберігання мінеральних добрив, руд, солей і інших споруд. Архітектурні рішення і технологічні процеси часто обмежують габарити несучих дерев'яних елементів, що обумовлює пошуки ефективного методу підвищення несучої здатності конструкції без зміни її габаритів і зовнішнього вигляду. Вимоги щодо збереження зовнішнього вигляду конструкції пред'являють також і при реконструкції будівель історичної та культурної цінності.

Одним із шляхів вирішення проблеми є підсилення конструкцій. Найбільш поширеними дерев'яними конструкціями є згинальні елементи і питання підсилення цих елементів з метою підвищення їх несучої здатності або відновлення при наявності дефектів є актуальними. Характерними дефектами для елементів, що зазнають згин є біологічні ушкодження, великі сучки в розтягнутій зоні, неякісні зубчасті шипи, позапроектні врізки, розшарування і поздовжні тріщини від усихання. У зв'язку з цим однією з актуальних завдань є розробка методів по відновленню і підвищенню несучої здатності і жорсткості дерев'яних конструкцій, що зазнають згин, сучасними матеріалами.

Мета роботи – визначення особливості напружено-деформованого стану дерев'яних елементів, армованих композитною арматурою.

Задачі дослідження.

Вивчення вітчизняного та зарубіжного досвіду армування дерев'яних елементів, що зазнають згин.

Теоретичне дослідження дерев'яних елементів, що зазнають згин, посилених поздовжнім армуванням полімерними композитними матеріалами

Об'єкт дослідження – несуча здатність і деформативність дерев'яних елементів, що зазнають згин, з поздовжнім армуванням полімерними композитами.

Предмет дослідження – дерев'яні елементи, що зазнають згин, посилені полімерними композитами.

Методи дослідження – метод скінчених елементів (програмний комплекс «Ліра-САПР»).

Наукову новизну складає:

- оцінка НДС дерев'яних конструкцій, що зазнають згин, армованих полімерними композитами, за результатами чисельних досліджень.

Практична значимість магістерської роботи полягає в тому, що отримані результати дослідження дозволяють отримати уяву про НДС дерев'яних конструкцій, армованих полімерними композитами і зробити висновки про можливість її використання при реконструкції або реставрації.

Апробація роботи.

Основні результати роботи доповідалися на студентській конференції Сумського національного аграрного університету.

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

За останні десятиліття дерев'яне будівництво значно просунулося, пропонуючи альтернативу традиційним матеріалам і методам. Склеювання волокнистого композиту за допомогою клеїв до дерев'яних конструкцій, для ремонту та зміцнення, має багато переваг. Однак відсутність усталених правил

проектування сильно стримує використання композитного зміцнення в багатьох ситуаціях, де це може бути кращим варіантом, ніж більшість традиційних методів. За останні роки було проведено значну кількість досліджень щодо експлуатаційних характеристик армованої композитами деревини та інженерних дерев'яних виробів. Розглянемо сучасний стан рецептур матеріалів, галузей застосування, підходів до проектування та питань контролю якості для практичних інженерів, щоб запропонувати склеювання композиту з деревиною на місці як новий спосіб проектування для ремонту та реконструкції конструкцій.

Полімерні матеріали, армовані волокнами, що поєднують високоміцні волокна та смоляну матрицю, мають широкий спектр промислового застосування завдяки високому співвідношенню міцності до ваги та легкості обробки. Їх універсальність відображається в будівельній галузі, де вони широко використовуються протягом багатьох років, особливо для зміцнення бетонних конструкцій [1, 2]. Зовсім недавно ці методи були поширені також на дерев'яні конструкції [3, 4, 5, 6].

Армування зі склопластику у вигляді пултрудованих стрижнів або пластин, а також тканих матеріалів має зростаюче та особливо ефективне застосування в ремонті дерев'яних конструкцій. Його можна вставляти в критичні місця для підвищення несучої здатності або для передачі навантаження, коли пошкоджені кінці балок обрізаються та замінюються новою деревиною або епоксидним розчином. Методи армування зазвичай базуються на використанні клеїв на місці та використовують процедури, які є звичайними для ремонту або модернізації бетонних та металевих конструкцій. Такі методи мінімізують порушення роботи будівлі та її мешканців під час втручання. Однак деякі побоювання перешкоджають ширшому використанню клеїв, особливо в історичних дерев'яних конструкціях, де достатня надійність ще не може бути гарантована. Одна з причин полягає в тому, що тривалий термін служби синтетичних клеїв ще не повністю доведений, оскільки найстаріші склеєні з'єднання мають лише близько шістдесяти років, а більший

вік неможливо імітувати за допомогою існуючих прискорених випробувань на старіння.

Полімери, армовані волокнами, та конструкційні клеї використовуються для ремонту або зміцнення конструкційних елементів протягом багатьох років. Однак цей підхід важко поширити на менш поширені породи деревини, менш сприятливі умови навколишнього середовища, нові рецептури клеїв та інші змінні. Відсутність усталених правил проектування, доступних інженерам та іншим особам, які приймають рішення, значно обмежує використання методів зміцнення скловолоконним композитом у багатьох ситуаціях, де вони могли б бути кращим варіантом, ніж більшість традиційних методів або повна заміна дерев'яних елементів.

Розглянемо матеріали, що використовуються для армування дерев'яних конструкцій композитів, представимо підхід до проектування розшарування лінії з'єднання, опишемо поточні та потенційні застосування композитів для армування дерев'яних конструкцій, викладемо правила проектування та, нарешті, узагальнимо відповідні процедури контролю якості для склеювання на місці.

2.1. Матеріали

2.1.1. Композитні армуючі матеріали

Композитні матеріали – це штучно створені матеріали, що складаються з двох або більше компонентів (матриці та армувальних наповнювачів) з чіткими межами між ними. Композити містять волокна, які забезпечують несучу здатність та жорсткість, вбудовані в полімерну смолу, яка передає навантаження між волокнами та забезпечує захист волокон. Вони доступні в широкому розмаїтті форм і мають властивості, які значно варіюються залежно від матеріалу волокна, об'ємної частки та орієнтації. Типові властивості поширених волокон і полімерів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Властивості волокон та полімерів [1]

Матеріал	Модуль пружності, ГПа	Міцність на розтяг, МПа	Деформація руйнування, %	КТР, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Щільність, $\text{г}/\text{см}^3$
Е-скло	70-80	2000-4800	3,5-4,5	5,0-5,4	2,5-2,6
Карбон (ВМП)	390-760	2400-3400	0,5-0,8	-1,45	1,85-1,90
Карбон (ВМ)	240-280	4100-5100	1,60-1,73	-0,6- -0,9	1,75
Арамід	62-180	3600-3800	1,9-5,5	-2,0	1,44-1,47
Базальт	82-110	860-3450	5,5	3,15	1,52-2,7
Полімер	2,7-3,6	40-82	1,4-5,2	30-54	1,1-1,25

КТР – коефіцієнт теплового розширення
 ВМП – високий модуль пружності
 ВМ – висока міцність

Для конструкційного армування зазвичай використовуються два основні види композитів, а саме: пултрузійні стрижні або пластини та тканини. Для внутрішнього армування пултрузійні стрижні та пластини скріплюються в пази або канавки, утворені в дерев'яному елементі. Для зовнішнього армування використовуються композитні пластини або тканинні матеріали.

2.1.2. Клеї

Армування деревини за допомогою композитів зазвичай здійснюється за допомогою клейового склеювання. Для склеювання пултрузійних композитних пластин клей наноситься на дерев'яну основу, а потім композитна пластина накладається на клей під тиском. Армування композитною тканиною зазвичай здійснюється методом мокрого укладання, при якому тканина спочатку просочується клеєм, а потім наноситься на деревину.

Клеї на основі епоксидної смоли в більшості випадків використовувалися для ремонтних робіт на місці, більшість рецептур були розроблені для інших матеріалів. Ці клеї, як правило, занадто жорсткі для склеювання деревини, і в них немає хімічного зв'язку або відповідного

механічного кріплення до деревини. Поверхня, що склеюється, схильна до руйнування через зміни розмірів деревини, викликані коливаннями вмісту вологи, навіть для внутрішнього застосування, такого як визначено в Єврокодї 5, клас обслуговування 2. Зовсім недавно були розроблені епоксидні рецептури спеціально для використання з деревиною. Нанесення клеїв на місці може бути складним, а якість клейового з'єднання нелегко оцінити. Оскільки властивості армованих елементів дуже сильно залежать від якості виконання робіт, необхідно дотримуватися відповідних процедур нанесення та контролю якості клею [7], [8].

Вибір клею для склеювання композиту з деревиною слід проводити з великою ретельністю. Клей повинен бути здатним склеюватися як з композитом, так і з деревиною, і повинен мати достатню міцність. Доступні чотири категорії клеїв: епоксидні смоли, поліуретани, поліефіри, фенольні смоли та амінопластики [9]. Хоча багато з цих типів клеїв, як було показано, забезпечують задовільні характеристики склеювання при використанні в контрольованому середовищі [10, 11, 12, 13, 14], двокомпонентні епоксидні клеї холодного затвердіння, як правило, є найбільш придатними для склеювання на місці, оскільки вони мають хороші властивості заповнення щілин, є тиксотропними та мають низьку усадку при затвердінні. Додаткову інформацію про клеї для склеювання на місці: характеристики, випробування, застосування можна знайти в [15].

Доступний широкий вибір епоксидних складів, і сумісність з клеями має бути перевірена виробником. На будівельному майданчику вміст вологи та якість поверхні деревини важко контролювати, і іноді неможливо досягти бажаного тиску склеювання. Товсті полоси склеювання порядку 1-3 мм є поширеними. Ретельна підготовка поверхні є важливою для досягнення гарної міцності та довговічності склеювання. Поверхні, що склеюються, повинні бути сухими, без забруднень, таких як розшарування та пил, і мати достатню шорсткість поверхні. Для композитів це включає стирання з подальшим очищенням розчинником або видаленням шару, якщо він передбачений.

Підготовку поверхні слід проводити безпосередньо перед склеюванням, а підготовка та нанесення клею повинні відповідати інструкціям виробника. Не можна недооцінювати важливість залучення досвідчених фахівців. Заходи контролю якості слід виконувати на кожному етапі процесу [16].

2.1.3. Зчеплення між поверхнею композиту та деревиною

Основним фактором успішного армування є цілісність зчеплення між композитом та дерев'яною основою [1],[17]. Протягом останніх двох десятиліть різні дослідники провели низку досліджень поведінки зчеплення композиту з деревиною, і було отримано багато корисних результатів, включаючи режими руйнування, розподіл напружень та локальну залежність між зчепленням та ковзанням.

У ранніх дослідженнях поведінки зчеплення композиту з деревиною, конфігурація випробувань, показана на рисунку 1(a), була модифікованою формою випробування на зсув блоку ISO 6238 та ASTM D905-03 [10, 11, 18, 19, 20, 21]. У цих випробуваннях міцність з'єднання на зсув визначалася як середнє напруження по довжині склеєної пластини. Оскільки поверхня композиту була затиснута між двома елементами деревини, деформації поверхні композитної пластини було важко контролювати, не кажучи вже про розподіл напружень зсуву та реакції зчеплення-ковзання.

Silva P. та ін. [22] провели чотириточкові випробування на згинання зчеплення деревини та композиту з використанням методів зміцнення за допомогою арматури, що монтується близько до поверхні (NSM), та зовнішнього кріплення арматури (EBR), що було зручно для отримання розподілу деформації композиту, розподілу напружень зсуву та реакцій зчеплення-ковзання. На основі випробувань Silva P., Juvandes L. та Barbos R. [23] проаналізували максимальну міцність анкера композиту та максимальну деформацію композиту, а також запропонували ефективну довжину скріплення для арматури EBR та NSM.

Wan J. та ін. [24] запровадили випробування на зсув зчеплення композиту з деревиною з одним врізанням, показані на рисунку 1(b), в яких досліджували міцність зчеплення між композитом та деревиною. Випробування на зсув проводилися на м'якій деревині (сосна), яка була зміцнена вуглецевим композитом, причому основними змінними випробувань були довжина з'єднання композиту та особливості росту деревини. Ретельне тензометричне вимірювання композиту дозволило контролювати виникнення та поширення тріщин відшарування. На основі результатів випробувань були визначені режими руйнування з'єднань та ефективна довжина з'єднання. Wan J. та ін. [17] також провели серію випробувань на 86 з'єднаннях композиту з деревиною з одним зсувом для вивчення склеєних поверхонь між композитом та деревиною. Параметри випробувань включали тип клею, тип композитної пластини та породу деревини. Результати випробувань показали, що всі з'єднання м'якої деревини руйнувалися переважно в деревині, тоді як з'єднання твердих порід демонстрували руйнування в різних положеннях межі поверхні. Розподіл навантаження-ковзання, деформації та напруження зчеплення, а також реакції напруження зчеплення-ковзання узгоджувалися з такими ж для з'єднань композиту з бетоном. Було запропоновано теоретичний закон залежності напруження від ковзання зчеплення на основі випробувань, що використовує метод J-інтеграла, і його можна реалізувати в аналітичних та числових моделях.



Рисунок 1 - (a) Конфігурація випробування блоку на зсув; (b) випробування на зсув в одному врізаному з'єднанні

Згадані вище композити були повністю листами або смугами. Досліджень щодо поведінки зчеплення деревини та композитних стержнів було проведено набагато менше. Logenzis L. та ін. [25] провели випробування на висмикування, щоб вивчити характеристики зчеплення композитних стержнів, вклеєних епоксидною смолою в клеєну деревину. Змінними випробувань були довжина склеювання, конфігурація поверхні стержня та напрямок деревних волокон відносно поздовжньої осі з'єднання. Спостережувані режими руйнування були когезійним руйнуванням деревини для стержнів, вклеєних паралельно до волокон, та адгезійним руйнуванням для стержнів, вклеєних перпендикулярно до волокон.

Окрім експериментальних досліджень, в останні роки було розроблено моделювання поведінки зчеплення композита і деревини методом скінченних елементів. Valipour H.R. та Crews K. [26] запропонували новий елемент на основі сили в рамках методу повного січного для нелінійного аналізу дерев'яних балок, посилені композитною пластиною (стержнем), включаючи ефекти зчеплення-ковзання. Формулювання враховує нелінійності матеріалу та зберігає неперервність зсуву-ковзання. Крім того, для розрахунку сил зсуву-ковзання вздовж елемента було використано композитну схему інтегрування Сімпсона зі схемою скінченних різниць. Було зроблено висновок, що для розглянутих випадків зсув-ковзання між композитною пластиною (стержнем) та деревиною має незначний вплив на граничну несучу здатність, а також на реакцію навантаження-прогин дерев'яних балок, посилені композитними пластинами (стержнями). Припущення про ідеальне зчеплення між композитом та дерев'яною балкою виявилось прийнятним у більшості випадків.

Підсумовуючи, дослідження поведінки зчеплення композиту з деревиною все ще перебуває на початковій стадії. Подальші дослідження слід провести для визначення впливу різних факторів, що впливають на зчеплення між композитом та деревиною, включаючи властивості деревини та зразки,

товщину (діаметри) та зразки композитних пластин (стержнів), а також товщину клею. Локальне співвідношення зчеплення-ковзання для композиту з деревиною, яке можна безпосередньо використовувати для аналізу методом скінченних елементів, безумовно, є предметом досліджень у майбутньому.

2.1.4. Пошкодження та розшарування композитів під навантаженням

Реалістичний підхід до проектування, що враховує руйнування та розшарування дерев'яних конструкцій, посилені композитами, потребує відповідних моделей матеріалів, що описують фізично обґрунтовані критерії руйнування анізотропних та нелінійних властивостей цих композитних конструкцій. Глобальні критерії руйнування з повною взаємодією напружень були першими розробленими критеріями руйнування [27]. Основною перевагою є простота використання аналітичних, числових та проектних підходів завдяки єдиному скалярному рівнянню руйнування для односпрямованих ламінатів. Ці гіпотези не містять інформації про режим руйнування композитів у тривимірних напружених станах; площина руйнування, паралельна волокнам, невідома. Комбінації напружень, такі як (τ_{21}, σ_2) та (τ_{31}, σ_3) , встановлюються рівними та не враховують важливість навантажень, перпендикулярних до волокна в межах площини волокна, які є критичними через розміри більшості конструктивних елементів.

Найпоширеніший критерій, що використовується в кодах скінченних елементів, був розроблений Tsai та Wu, що показано в рівнянні (1). Симетрія властивостей матеріалу враховується коефіцієнтами міцності, які можна легко перетворити в їх інваріантність.

$$F = \frac{D_0}{F_{11}} \sigma_1 + \frac{D_{90}}{F_{22}} \sigma_2 + \frac{D_{90}}{F_{22}} \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{F_{11}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{22}} + \frac{\sigma_3^2}{F_{22}} + F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{12} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + \frac{\tau_{12}^2}{f_{v,90,0}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{f_{v,90,90}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{f_{v,90,90}^2} = 1 \quad (1)$$

де:

$$F_{11} = \frac{1}{f_{t,0}f_{c,0}} \quad F_1 = \frac{1}{f_{t,0}} + \frac{1}{f_{c,0}}$$

$$F_{22} = \frac{1}{f_{t,90}f_{c,90}} \quad F_2 = \frac{1}{f_{t,90}} + \frac{1}{f_{c,90}}$$

$$F_{12} = 0 \quad 2F_{23} = \frac{2}{f_{c,90}f_{t,90}} + \frac{1}{f_{v,90,90}^2}$$

$$D_0 = f_{c,0} - f_{t,0} \quad D_{90} = f_{c,90} - f_{t,90}$$

$f_{t,0}$ – міцність на розтяг у напрямку волокон

$f_{c,0}$ – міцність на стиск у напрямку волокон

$f_{t,90}$ – міцність на розтяг перпендикулярно напрямку волокон

$f_{c,90}$ – міцність на стиск перпендикулярно напрямку волокон

$f_{v,90,0}$ – міцність на зсув в площі композиту

$f_{v,90,90}$ – міцність на зсув перпендикулярно до площі композиту

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – нормальні напруження і $\tau_{23} = \tau_{32}, \tau_{13} = \tau_{31}, \tau_{12} = \tau_{21}$ – дотичні напруження, пов'язані з системою координат (x_1, x_2, x_3) однонаправленого композиту, де (x_1, x_2) – площа описує площу композиту, а x_3 – напрямок товщини (рисунок 2).

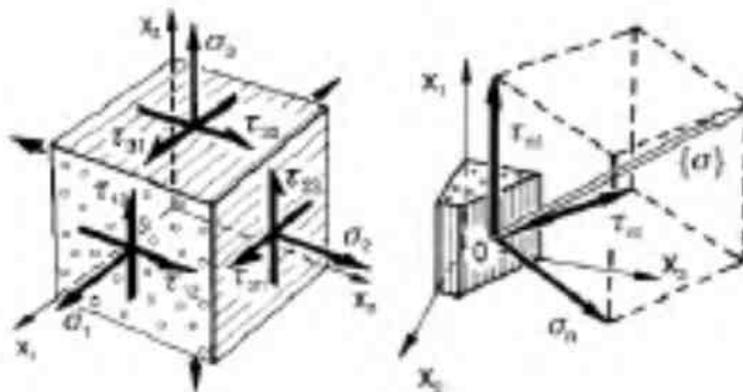


Рисунок 2 - Напруження в односпрямованих композитах

Згідно з цією гіпотезою, більшість режимів руйнування можна описати, але руйнування волокон (FF) та міжшарове руйнування волокон (IFF) неможливо ідентифікувати. Крім того, збільшення міцності не можна представити максимальним критерієм, а лише інтерактивним критерієм. Тому для композиту рекомендується поєднання загального критерію Tsai-Wu з

гіпотезою максимальних напружень, інакше будуть прийняті напружені стани, що перевищують одиничне значення міцності.

Кожен механізм руйнування визначається однією міцністю, пов'язаною з певним режимом. Умови руйнування повинні бути просто сформульованими, чисельно стійкими та фізично обґрунтованими, а також дозволяти просте визначення граничного напруження. Найважливіші дослідження були проведені А. Ріска у подальшому розвитку класичної теорії Мора та критеріїв руйнування Хашина [28]. Ключовим твердженням у його пропозиції є те, що руйнування в площині розриву, паралельній волокнам, при розтягу, перпендикулярним до площини, спричинене напруженнями розтягу, а також дотичними напруженнями τ_{nt} та τ_{n1} (рівняння 2), тоді як сили стиску, перпендикулярні до площини волокна, збільшують опір зсуву.

Подальшим удосконаленням цього критерію стало введення додаткового члена внутрішнього кулонівського тертя для врахування підвищення жорсткості під напруженням нижче границі руйнування внаслідок стиску. Для випадку армування на розтяг, загальний критерій руйнування Пака задається легко модифікованою 7-параметричною моделлю, яка ідентифікує FF та IFF для проектних задач. Більш складна версія була розроблена у вигляді математично простішого критерію руйнування Пака-Кнаушта-IFF [28].

$$F = \frac{\sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_2\sigma_3 + \tau_{23}^2}{f_{t,90}f_{c,90}} + \left(\frac{1}{f_{t,90}} - \frac{1}{f_{c,90}} \right) (\sigma_2 + \sigma_3) + \frac{\tau_{21}^2 + \tau_{31}^2}{f_{v,90,0}^2} + \frac{1}{f_{t,0,IFF}f_{c,0,IFF}} \sigma_1^2 + \underbrace{\left(\frac{1}{f_{t,0,IFF}} - \frac{1}{f_{c,0,IFF}} \right) \sigma_1}_{F(\sigma_1)} \quad (2)$$

де $F(\sigma)$ – площа перелому

Визначення руйнування є проблемою під час аналізу руйнувань. Зокрема, початкове руйнування, таке як розшарування, має бути визначене правильно. Перед використанням критеріїв відмови необхідно оцінити їх класифікацію з погляду їхнього початкового призначення:

- Діапазон аналізу (перший шар або після руйнування)
- Фізична модель (мікро-, макро- або компонентний рівень)
- Математичний підхід (граничний, поліноміально-тензорний або фізично обґрунтований)

Однією з найсерйозніших проблем поширення знань про руйнування композитних матеріалів є відповідні програмні коди для постобробки. Критерій Цая-Ву реалізований у більшості програмних продуктів, наприклад, ANSYS® чи ABAQUS®, які дозволяють аналізувати композитні конструкції. Завдяки однаковому математичному структурному параболічному критерію Пака-Кнауста та критерію Цая-Ву у формі тензорних поліномів, критерій Пака-Кнауста можна реалізувати в комерційних кінцевих кодах для адекватного проектування композитних конструкцій шляхом розширення включення критеріїв руйнування. Комплексний математичний вираз модифікації та реалізації завдань інженерного проектування наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 - Показники міцності для модифікованих критеріїв Цай-Ву за методом Пака-Кнауста для композиту

Індекс міцності	Модифікація FF	Модифікація IFF	Індекс міцності	Модифікація FF	Модифікація IFF
$f_{t,x}$	$f_{t,0}$	$1,3f_{t,0}$	$f_{v,xy}$	$> 10^4$ МПа	$f_{v,0,90}$
$f_{c,x}$	$f_{c,0}$	$1,3f_{c,0}$	$f_{v,yz}$	$> 10^4$ МПа	$\sqrt{\frac{1}{3f_{t,90}f_{c,90}}}$
$f_{t,y}$	$> 10^4$ МПа	$f_{t,90}$	$f_{v,zx}$	$> 10^4$ МПа	$f_{v,90,90}$
$f_{c,y}$	$> 10^4$ МПа	$f_{c,90}$	C_{xy}	0	0
$f_{t,z}$	$> 10^4$ МПа	$f_{t,90}$	C_{yz}	0	-1
$f_{c,z}$	$> 10^4$ МПа	$f_{c,90}$	C_{zx}	0	0

Завдяки математично подібному визначенню критеріїв Цай-Ву та критеріїв Піка-Кнауста за допомогою тензорних поліномів, реалізований алгоритм у скінченно-елементних кодах може бути модифікований за допомогою таблиці 2 для специфіки волокнисто-армованих полімерів та власних аналізів напружень та руйнування.

Декогезія вздовж поверхонь розділу фаз відіграє важливу роль у широкому спектрі процесів руйнування конструкцій при використанні хімічного зв'язку як оптимальної форми поєднання двох поверхонь одна з одною. Аналіз ініціації розшарування базується на напруженнях та критеріях взаємодії міжшарових напружень у поєднанні з характерною відстанню як функцією геометрії та властивостей матеріалу. Поширення тріщини прогнозується за допомогою підходу механіки руйнування (МР). Це дозволяє уникнути труднощів, пов'язаних із сингулярністю напружень на фронті тріщини, але вимагає наявності попередньо існуючого розшарування. При окремому використанні ні підхід, заснований на міцності, ні підхід МР не є адекватними для аналізу руйнування внаслідок прогресуючого розшарування.

Для комбінації анізотропних матеріалів, таких як деревина, з армуванням з композиту у законі пошкодження межі розділу, необхідно враховувати взаємодію між зсувними та нормальними напруженнями. Цю проблему можна вирішити за допомогою аналізу розшарування та експоненціального закону пошкодження межі розділу [29]. Визначення зчеплення та відриву залежить від кінцевого елемента та застосованої моделі матеріалу.

Декогезійна реакція визначається через поверхневий потенціал $\Phi(\delta)$, що пов'язує зчеплення на межі розділу та відносні нормальні та тангенціальні зміщення δ_n та δ_t поперек межі розділу. У більшості розрахунків вважається, що всі когезійні поверхні мають однакові когезійні властивості, що спрощує поверхневий потенціал [30] до

$$\Phi(\delta) = e\sigma_c\bar{\delta}_n \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta_n}{\bar{\delta}_n} - \frac{\delta_t^2}{\bar{\delta}_t^2}\right) \right] \quad (3)$$

e – константа Ейлера

σ_c – максимальне нормальне зчеплення на межі розділу

$\bar{\delta}_n$ – нормальне розділення, де досягається максимальне нормальне зчеплення з $\delta_t = 0$

$\bar{\delta}_t$ – зсувне розділення, де досягається максимальне зсувне зчеплення

Потенціал призводить шляхом виведення на основі переміщень до напружень, якщо $\delta < \delta_{max}$, де компоненти зчеплення T пов'язані як з нормальними, так і з тангенціальними переміщеннями розкриття тріщини. Головною перевагою моделювання когезійної зони є те, що, коли апріорі відомо, де може відбутися руйнування, когезійну зону можна розмістити будь-де вздовж меж елементів у цій області, щоб врахувати ці ефекти. Крім того, використовуючи елементи декогезії, можна моделювати як початок, так і поширення розшарування без попереднього знання місця розташування тріщини та напрямку поширення, і тому це підходить для проектування та оцінки композитних балок.

2.1.5. Пошкодження композиту внаслідок вогню

Коли композит піддається впливу підвищених температур, міцність і жорсткість знижуються через втрату механічної цілісності полімерної матриці [3]. Двокомпонентні епоксидні клеї, які зазвичай використовуються для склеювання, мають температуру склеювання нижче 100°C . Для зовнішньої розташованої композитної арматури вплив високих температур у пожежній ситуації може призвести як до втрати армуючої дії композитів, так і до погіршення зв'язку між композитом та деревиною. Щоб запобігти цій ситуації, для захисту арматури можна використовувати природні ізоляційні властивості деревини, забезпечуючи належне дерев'яне покриття композиту.

Martin ZA та Tingley DA. [31] провели програму випробувань, в якій контрольні клеєні балки, армовані та неармовані композити, були піддані стандартному вогневому впливу та механічним навантаженням, що дорівнюють або перевищують розрахункові навантаження. Балки були армовані трьома різними типами композитних пластин, прикріплених або зовні до кесону, або між двома нижніми шарами. Результати показали, що внутрішньо армовані балки мали на 44% вищу вогнестійкість порівняно із зразками, армованими зовні. Різниця у вогнестійкості між різними типами композиту не виявлено. Williamson T.G. [32] показав, що клеєні балки із

зовнішньо прикріпленим композитом можуть бути запроєктовані для досягнення 1-годинної вогнестійкості. Випробування на вогнестійкість клеєних балок з ремонтом кінців балок, що включав короткі балки з заміною епоксидною смолою, прикріплені до основних балок за допомогою сталевих арматурних стрижнів [33], показали, що цей ремонт може забезпечити вогнестійкість протягом однієї години. У цьому випадку сталеві стрижні мали мінімальне покриття поверхні 60 мм.

2.2. Застосування

2.2.1. Армування торців балки

Щоб зробити вставки мінімально впливовими, з'єднувальні елементи обмежуються кутами балки, а їхня довжина зменшується до необхідного



Рисунок 4 - Похилий зрізаний згнилий кінець



Рисунок 3 - З'єднувальні канавки

мінімуму. Технології виконання залежать від конкретних вимог будівельного майданчика. Це починається з підпирання балок, після чого виконується видалення згнилої частини деревини, зазвичай завершується похилим розрізом (рисунок 3). Нова секція деревини формується відповідно до зовнішніх розмірів оригінальної згнилої секції. Після підготовки внутрішніх отворів або зовнішніх канавок між оригінальною та щойно введеною деревиною для розташування з'єднувальних елементів (рисунок 4), отвори або канавки частково заповнюються клеєм, і вставляються армуючі елементи. Останнім етапом є



Рисунок 5 – Фінальне розклинювання

вставка остаточної дерев'яної заготовки, щоб приховати пази (рисунок 5), а потім видалення опор балки після повного затвердіння клею.

Епоксидні смоли використовувалися в окремих випадках для ремонту деревини, яка уражена внаслідок гниття або нападу комах, а також через певні структурні дефекти в

існуючих конструкціях. Міцність на стиск та заповнювальні властивості епоксидних смол можуть допомогти в ремонті дерев'яних конструкцій. Міцність на розтяг, зсув та міцність склеювання епоксидних смол як конструкційних клеїв для деревини в деяких випадках обмежені та також можуть змінюватися через умови використання.

Механічне армування слід використовувати разом з епоксидними смолами для ремонту, спрямованого на підвищення міцності на зсув. Для реконструкції та відновлення конструкцій зруйновані кінці обрізаються та



Рисунок 6 - Зсувне армування композиту із скловолоконним композитом

замінюються деревиною або полімербетоном, де сили зсуву та розтягу, що виникають внаслідок навантажень, передаються за допомогою армування з скловолоконного

заповнювальним компаундом на основі PU або EP смоли між новою та існуючою деталлю (рисунок 6).

У деяких випадках зруйнована частина конструкції буде замінена полімербетонною (ПБ) добавкою з використанням швидкотвердіючих

органічних полімерів як в'язучих речовин та дрібного заповнювача, такого як пісок або гравій. Застосування ПБ у структурному відновленні та реставрації має ряд переваг. Історично значущі споруди можна захистити, мінімально втручаючись у конструкцію та замінюючи зруйновані частини. Зовнішній вигляд дерев'яної конструкції не зміниться. Конструкцію перерізу можна легко виконати за допомогою дерев'яної опалубки на рівні необхідної висоти конструкції. Всі роботи можна виконувати зверху, тому підвісні стелі залишаться неушкодженими. Підлога під реконструкцією може використовуватися з деякими обмеженнями. Метод підходить для житлових поверхів та відновлення складних дерев'яних з'єднань. Повна несуча здатність досягається через один день зі збільшенням конструктивних характеристик на 140% для дерев'яних добавок та 30% для ПБ добавок, як повідомляють Schober K.U. та ін. [29, 30].

2.2.2. Розтягнута арматура, перпендикулярна до волокон

Міцність на розтяг деревини, перпендикулярно до волокон, значно нижча порівняно з міцністю на розтяг, паралельно до волокон. Високі напруження розтягу, перпендикулярні до волокон, виникають у виїмках, отворах або криволінійних балках та балках зі змінною висотою. Для збільшення або підтримки несучої здатності цих конструкцій необхідні ефективні методи армування. Армування повинно забезпечувати високу міцність і жорсткість, а також створювати більш пластичне руйнування конструкції. Армування, виготовлене з композиту, забезпечує високу міцність і жорсткість уздовж напрямку волокон; однак, це зазвичай не призводить до більшої пластичності конструкції. У літературі щодо досліджень та застосувань композитним армування ділянок з розтягом, перпендикулярним до волокон, відносно мало інформації через існування інших методів армування, що пропонують більшу пластичність, таких як, наприклад, саморізи.

Загалом, армування слід наносити поблизу області високих розтягувальних напружень, перпендикулярних до волокон. Як обговорювалося Hallström S. та Grenestedt J.L. [34], використання внутрішнього армування може бути необхідним для внутрішніх елементів, які недоступні з їхніх зовнішніх боків. Для обгортання дерев'яного елемента скловолокнистими тканинами хороший доступ до елемента з усіх боків є вирішальним.

Дослідження балок з клеєної деревини (клеєний брус) з отворами, армованими скловолокном, описані в роботах Hallström S. та Grenestedt J.L. [34, 35]. Метою було зменшення сингулярності напружень у куті отвору шляхом зміни анізотропії за допомогою армування. Однак теоретичне зменшення напружень у куті отвору було значно меншим, ніж рівень збільшення несучої здатності, що спостерігався у випробуваннях. Вплив перерозподілу навантаження з деревини на скловолоконний композит був підтверджений у порівняльному моделюванні методом скінчених елементів.

Результати випробувань клеєних брусів з надрізами, армованими за допомогою пластин зі скловолокна (скловолоконного композиту), представлені Cougeau J.L. та ін. [36]. Армовані балки з надрізами показали вищу несучу здатність порівняно з контрольними випробуваннями неармованих балок. Вища несуча здатність була досягнута у випробуваннях зі збільшенням ширини пластин зі скловолокна (композиту). Руйнування армованих балок з надрізами супроводжувалося розшаруванням пластин зі скловолокна (композиту). Розшарування ламінатів композиту також спостерігалося у випробуваннях, проведених Jockwer R. [37]. У випадку армування перпендикулярно до волокон, розшарування відбувалося в нижній частині балки через недостатню площу лінії з'єднання, тоді як у випробуваннях, армованих під кутом 45° до волокон, розшарування відбувалося у верхній частині балки поблизу опори через високу відносну різницю напружень між деревиною при стисканні, перпендикулярному до волокон, та вуглеволокном при розтягуванні в напрямку волокон. В обох

типах конфігурації вуглеволокна запобігти утворенню тріщин у деревині в куті надрізу арматурою не вдалося. Дві конфігурації проілюстровано на рисунку 7.

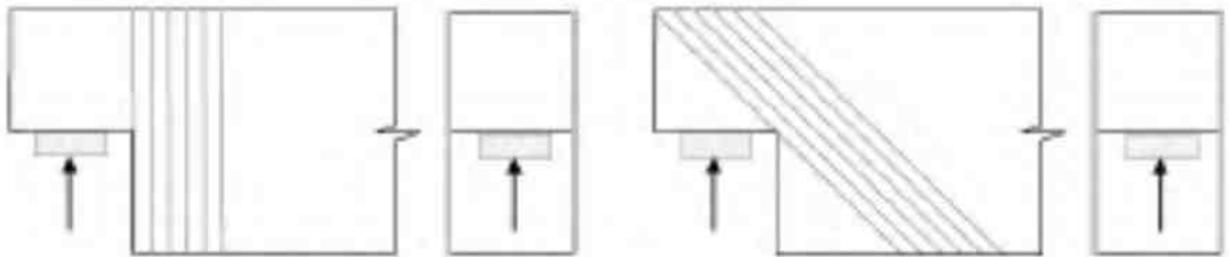


Рисунок 7 – Композитне армування балок з надрізами

Випробування криволінійних та похилих балок з вигином, армованих за допомогою скловолоконного композиту, описані в роботі Enquist В. та ін. [38]. Армування, перпендикулярне до волокон, призвело до значного збільшення несучої здатності порівняно з неармованими балками. Під час випробувань спостерігалось руйнування склопластикового композиту на розтяг та відшарування. Ремонт радіальної арматури для криволінійних згинальних елементів також можна виконати, розмістивши стрижні склопластикового композиту у збільшених отворах, заповнених епоксидним ПБ. Тут радіальні напруження передаються через епоксидний ПБ при зсуві.

Потреба в подальших дослідженнях застосування склопластикового композиту як арматури, розташованої паралельно волокнам, включає [38]:

- Довгострокові випробування для врахування впливу змін вологості та умов навколишнього середовища
- Випробування балок реального розміру для врахування впливу масштабування.

2.2.3. Арматура на згинання

Армування дерев'яних елементів при згинанні за допомогою прутів, смуг, пластин або інших конструкційних форм з пултрузійного склопластику (композиту) та тканинних обгорток було предметом великої кількості

дослідницьких програм протягом останніх 50 років. Армування може бути розташоване всередині шляхом скріплення прутів або смуг у пазах, вирізаних на розтягнутих та стиснених поверхнях елемента, або зовні шляхом скріплення композитних пластин до розтягнутої поверхні, але не на стисненій поверхні, через ризик руйнування композиту від вигину. Експериментальні дослідження армування суцільних дерев'яних балок та клеєного бруса армуванням з вуглецевого волокна, проведені кількома дослідниками [39, 40, 41, 42, 43, 44], показали, що використання невеликого відсотка армування, порядку 1,5-2,5%, може призвести до збільшення міцності на згин та жорсткості до 90% та 100% відповідно. Крім того, було показано, що армовані балки мають меншу мінливість у своїх властивостях, ніж неармовані балки. Зі збільшенням кількості розтягнутої арматури реакція навантаження-прогин стає пластичною через текучість при стисканні при високих рівнях деформації.

Через високу вартість, пов'язану з матеріалами з вуглецевого волокна (вуглецевого композиту), кілька дослідників [44, 45, 46, 47] вивчали армування дерев'яних елементів на згин за допомогою скловолоконного композиту. Що стосується вуглецевого композиту, то повідомлялося про значне збільшення міцності при використанні невеликого відсотка армування. Однак збільшення жорсткості було менш значним через меншу жорсткість матеріалу скловолоконного композиту. Було виявлено зменшення мінливості в характеристиках армованих елементів. Була досягнута обмежена пластичність, яка зростала зі збільшенням відсотка армування. Зовсім недавно було проведено армування деревини на згин за допомогою полімеру, армованого базальтовим волокном (базальтового композиту), з багатообіцяючими результатами [49].

2.2.4. Арматура на зсув

У літературі описані різні дослідження армування та ремонту ділянок з високими напруженнями зсуву в клеєних балках. Дослідження частіше проводилися для порівняння різних методів армування та оцінки ефекту

армування, ніж для валідації чи перевірки процедур проектування. Загалом, випробування можна грубо розділити за тим, чи було армування нанесено зовні, чи розташовано всередині. Зовнішнє армування зазвичай виконувалося за допомогою пластин, тканин або ровінгу зі скловолокна (композиту). Внутрішнє армування зазвичай виконувалося стрижнями зі склопластикового композиту. Різні методи та відповідні параметри наведено нижче.

Гарний огляд літератури щодо зсувного посилення дерев'яних балок за допомогою композитів наведено André A. [4]. Основна увага в цій роботі зосереджена на властивостях різних волокнистих матеріалів. Поведінку механічно з'єднаних плит скловолоконного композиту як зсувного армування дерев'яних балок оцінили Akbiyik A. та ін. [50]. Однак, відновити жорсткість непошкоджених балок за допомогою цього методу армування неможливо.



Рисунок 8 - Зовнішньо нанесені композитні пластини

Triantafillou T. [5, 51] запропонував та оцінив підхід до розрахунку напружень у деревині балки, посиленої за допомогою композитних пластин. Підхід перевірено в серії експериментів на

зразках малого розміру. Основним завданням дослідження було визначення необхідної площі композитних пластин та відносної висоти арматури для зменшення зсувних напружень у деревині. Цей підхід дійсний лише для непошкоджених дерев'яних балок без розрізів у поперечному перерізі, а отже, не є адекватним для ремонту конструкцій. Як обговорювалося в [5, 51], армуючий ефект композитів залежить від його жорсткості в напрямку волокон деревини. Отже, використання багатонаправлених композитних тканин або односпрямованого композитного ровінгу з малим кутом β відносно напрямку волокон деревини є корисним як для міцності, так і для жорсткості армованої балки.



Перевагами внутрішнього армування за допомогою стрижнів зі скловолокна (композиту) є гарна естетика дерев'яної поверхні балки

та можливість армування балок з обмеженим доступом з боків. Отже, стрижні зі скловолокна є хорошим методом для ремонту балок на місці [52]. Велика серія випробувань пошкоджених балок залізничних мостів, армованих за допомогою стрижнів зі скловолокна, встановлених з $\beta = 90^\circ$, описана в роботах Radford D.W. та ін. [6] та Burgers T. та ін. [53]. У випробуваннях спостерігалось значне збільшення жорсткості на зсув пошкоджених балок. Порівняно із зовнішнім обгортанням склотканиною, внутрішні стрижні зі скловолоконного композиту демонструють меншу жорсткість, але також менше використання матеріалу та простіший монтаж. Останній момент має особливе значення, якщо балки доступні лише з нижньої поверхні. Стрижні зі скловолоконного композиту з $\beta = 90^\circ$ були випробувані Gentry T.R. [54] на клеєних брусах малого та середнього розміру. Спостерігався загальний хороший армуючий ефект та збільшення несучої здатності на зсув приблизно на 50%. Метод армування балок за допомогою композитних стрижнів з $\beta = 90^\circ$ також називають методом Z-подібного шипування.

Випробування клеєних балок, армованих штифтами з склопластику, на зсув та згин проводили Svecova D. та Eden R.J. [55]. Внутрішнє зсувне армування застосовувалося з різною відстанню a_1 між стрижнями частково по всій довжині балки та частково лише в області високого зсувного зусилля поблизу опори. Стрижні встановлювалися перпендикулярно до волокон під кутом $\beta = 90^\circ$. Це дозволило збільшити несучу здатність, зменшити мінливість балок, збільшити прогин перед руйнуванням і, отже, надати балкам певну пластичність. Автори рекомендують на основі випробувань відстань між штифтами, що дорівнює товщині балки.

Приклад практичного застосування обгортки з вуглецевого волокна навів Lauber V. [56]. Кроква була посилена на зсув шляхом обгортання її

тканиною з вуглецевого волокна у формі літери U. Перевагою тканини, порівняно з пластинами, є краща гнучкість під час монтажу та можливість адаптації до інших з'єднувальних елементів. Для згладжування поверхні та створення хорошого зчеплення між деревиною та вуглецевим волокном, необхідна точна підготовка поверхні існуючої балки. Підкреслюється, що для запобігання розшаруванню та гарантування довгострокової міцності необхідні постійні умови навколишнього середовища та постійний вміст вологи в конструкції.

Sonti, S.S. та Gangarao H.V.S. [57] виявили, що обгортки зі скловолокна є достатніми для підвищення міцності та жорсткості дерев'яних балок в інфраструктурному застосуванні. Widmann R. та ін. [58, 59] провели серію випробувань на зразку балки реального розміру з тріщинами зсуву, армованими за допомогою ровінгу з вуглецевого волокна з $\beta = 45^\circ$. При цьому куті нахилу волокон спостерігалось значне збільшення жорсткості пошкодженої балки.

2.2.5. Попередньо напружений композит

Ефективність армування композитними матеріалами можна покращити шляхом попереднього напруження. При пасивному або слабому армуванні несуча здатність композиту часто не досягається, оскільки руйнування зазвичай відбувається в дерев'яному елементі. У випадку розтягувального армування балок, розтягувальне зусилля зазвичай прикладається до композитної пластини або стрижня за допомогою гідравлічних домкратів перед тим, як з'єднати їх з дерев'яним елементом під тиском. Ексцентричне попереднє напруження викликає значні стискаючі напруження в нижній частині балки, які протидіють розтягуючим напруженням, спричиненим зовнішніми навантаженнями. Таким чином, збільшується міцність балки на згин. Крім того, вищі стискаючі напруження в деревині під дією зовнішніх навантажень призводять до пластичної реакції. Попереднє напруження балки також впливає на деформацію елемента. Коли домкратне зусилля звільняється,

балка вигинається вгору. Цей прогин може бути компенсований прогином, спричиненим зовнішніми навантаженнями, тим самим забезпечуючи видиме збільшення жорсткості на згин.

Кілька дослідників досліджували можливість попереднього напруження дерев'яних балок за допомогою пластин з армованого скловолокна. Ще у 1992 році Triantafillou T.C. та Deskovic N. [60] провели невелику програму випробувань, в якій одна дерев'яна балка була армована 2,5% попередньо напруженою пластиною з вуглецевого волокна, прикріпленою до кесону балки. Було досягнуто збільшення міцності на 40% порівняно з 16% для пасивного армування. Зовсім недавно Dagher H. та ін. [61] випробували клеєні балки довжиною 6,7 м з 1% арматурою з склопластикового композиту, прикріпленого до кесону за допомогою фібринового клею. До склопластикової пластини за допомогою гідравлічних домкратів було прикладено попереднє напруження, що становило 30% від граничної міцності на розтяг. Було виявлено, що міцність попередньо напружених балок на 95% вища, ніж у неармованих балок, і на 38% вища, ніж у пасивно армованих балок. Середній попередній вигин балок становив 10,9 мм, що можна компенсувати допустимим прогином. Rodd P.D. та Pope D.J. [62] досліджували поведінку попередньо напруженої клеєної балки з склопластикового композиту з буферним шаром, приклеєним до нижньої грані склопластиковою пластиною. Lehmann M. та ін. [63] повідомили про збільшення опору згину на 30% у суцільних дерев'яних балках при попередньому напруженні з 0,3% углекислого композиту. Попередній прогин становив близько 30% від допустимого прогину.

Ключовим обмеженням є той факт, що сила попереднього напруження повинна бути закріплена на кінцях балок. Передача навантаження відбувається на короткій довжині на кінці лінії з'єднання, і може виникнути розшарування через локальну концентрацію напружень. Brunner M. та Schnuegger M. [64] описали градієнтний пристрій попереднього напруження, розроблений ЕМРА, як можливе рішення цієї проблеми. У цьому методі

затвердіння епоксидного клею здійснюється контрольованим чином за допомогою тепла для прискорення затвердіння. Починаючи з середини прольоту і поступово рухаючись до опори, зменшуючи силу попереднього напруження, це гарантує, що сила попереднього напруження закріплюється на більшій довжині, а сила на кінці зменшується. Альтернативний підхід [64] полягає у знятті домкратного зусилля одразу після прикладання тиску склеювання.

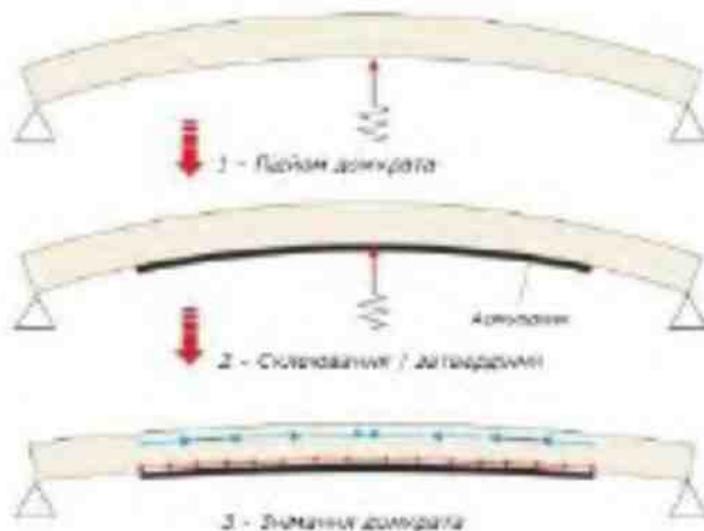


Рисунок 10 - Процедура попереднього напруження деревини з використанням композиту на місці

Це досягається за допомогою регульованої стійки, розташованої в центрі балки. Цей підхід має додаткову перевагу, оскільки він створює трикутний розподіл згинального моменту в балці завдяки силі стійки, що призводить до низького, постійного напруження зсуву в клейовій лінії. Цей метод може не підходити для великих балок, оскільки необхідна сила на упорі може бути занадто великою.

Інший метод, нещодавно розроблений в Технологічному університеті Чалмерса, – це ступінчасте попереднє напруження пластин, яке значно зменшує концентрацію напружень на кінцях пластин, роблячи механічне кріплення непотрібним [64]. Цей метод відрізняється від градієнтного пристрою попереднього напруження, розробленого ЕМРА, тим, що він

Попереднє напруження композиту за допомогою гідравлічних домкратів може не підходити для застосування на місці. Альтернативний метод, запропонований Negrão J. та ін. [63], передбачає попереднє вигинання деревини перед встановленням композитної арматури, як показано на

базується на ступінчастому введенні сили попереднього напруження в пластину, а не на поступовому звільненні сили попереднього напруження. Також було розроблено спеціальне обладнання для натягування пластини таким чином, щоб вся сила попереднього напруження поступово вводилася в пластину дискретно або безперервно, розподіляючи загальну силу на десять кроків. Числові та експериментальні дослідження показують, що можна зменшити напруження зсуву та відшаровування в лінії з'єднання до рівнів нижче 1 та 0,2 МПа відповідно, для сили попереднього напруження 100 кН. Ці значення значно нижчі за міцність на зсув та розтяг, перпендикулярну до волокон деревини та клеїв.

Моделі розрахунку для попередньо напружених дерев'яних балок з композитів були представлені низкою дослідників. Brunner M. та Schnueriger M. [64] описують розрахункову модель для випадку попередньо напруженої композитної пластини, прикріпленої до нижньої частини балки, з використанням ітераційного підходу для визначення моментної здатності та лінійно-пружної ідеально пластичної моделі для деревини, що стискається. Triantafillou T.C. та Deskovic N. [60] розглядали ту саму ситуацію, але використовували білінійну модель з падінням гілки після текучості для реакції на стиск. Brady J.F. та Harte A.M. [65] представили вираз замкнутої форми для моментної здатності попередньо напружених клеєних балок, що включають буферну шаруватість, яку покриває композит, де деревина, що стискається, моделювалася за допомогою білінійної моделі з падінням гілки після текучості. McConnell E. та ін. [66] представляють теоретичну модель для клеєних елементів, попередньо напружених за допомогою армованих арматурних елементів.

Довгострокова експлуатація попередньо напруженої деревини потребує подальшого дослідження, перш ніж цей метод можна буде рекомендувати до використання.

2.3. Проектування

2.3.1. Підсилення елементів, які працюють на згин

Згинальна арматура може бути розміщена на розтягнутих та стискаючих поверхнях елемента та може бути у вигляді зовнішньо скріплених пластин (ЗСП) або стрижнів, пластин або смуг, що монтуються поблизу поверхні (МПП). Зовнішньо скріплені пластини не рекомендуються для стискаючої арматури через ймовірність вигину.

Аналіз підсилених дерев'яних елементів, що піддаються згину, базується на класичному підході до оцінки опору матеріалів. Аналіз базується на таких припущеннях:

- Поперечний переріз елемента симетричний у площині згину
- Плоскі перерізи залишаються плоскими
- Відсутність розшарування або зсуву між композитом та деревиною
- Композитний матеріал є лінійно-пружним до руйнування на розтяг та стиск
- Деревина є лінійно-пружною до руйнування на розтяг та нелінійною до стиску

Для моделювання нелінійної поведінки деревини під час стискання використовувалися різні конститутивні моделі. Білінійна модель Базана-Б'юкенена [67] припускає лінійно-пружну поведінку до межі текучості, після якої слідує спадна гілка з негативним нахилом. Низка авторів [42, 45, 65] виявили, що ця модель добре відповідає експериментальним результатам. У багатьох випадках дані про нахил спадної гілки недоступні, і в такому випадку використовувалася спрощена лінійно-пружна, ідеально пластична модель [40, 46]. Квадратне наближення також успішно використовувалося [43].

Для визначення граничної міцності на стиснення необхідно враховувати всі можливі режими руйнування. У великій кількості програм випробувань за останні двадцять років було виявлено, що руйнування композитної арматури

малоймовірне, і на практиці потрібно враховувати лише два режими руйнування. Це:

- Режим 1: Руйнування деревини на розтяг, тоді як на стиск реакція є лінійно-пружною
- Режим 2: Руйнування деревини на розтяг після початку стискаючої текучості

Ці два сценарії проілюстровано нижче для балок з армуванням МПП з обох граней.

Для режиму руйнування 1 максимальна деформація розтягу в деревині, ε_2 , досягає граничного значення, тоді як максимальна деформація стиску, ε_1 , менша за деформацію текучості.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{tu}; \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cy} \quad (4)$$

де ε_{tu} – гранична деформація розтягу деревини, а ε_{cy} – гранична деформація текучості деревини при стиску.

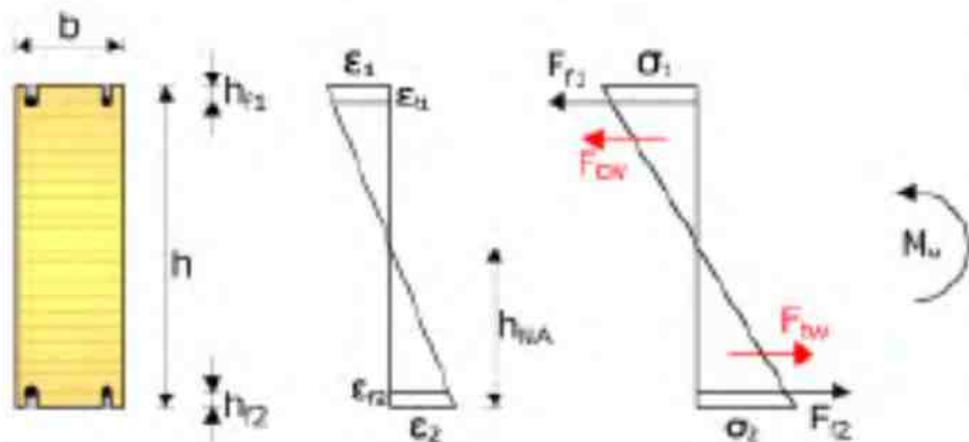


Рисунок 11 - Режим відмови 1

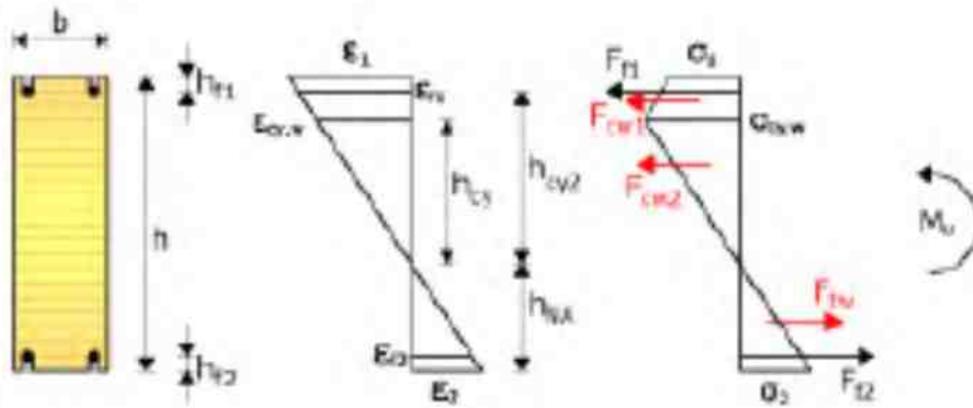


Рисунок 12 - Режим відмови 2

Аналіз базується на сумісності деформацій та рівновазі сил. Рівновага осьових сил, що діють на армований переріз, вимагає, щоб

$$F_{f1} - F_{f2} + F_{cw} - F_{tw} = 0 \quad (5)$$

де F_{f1} та F_{f2} – це сили в арматурі стиску та розтягу відповідно, а F_{cw} та F_{tw} – загальні сили стиску та розтягу в деревині відповідно.

Оскільки всі члени деформації лінійно пов'язані, рівняння (5) зводиться до

$$E_f A_{f1} \cdot \frac{h - h_{NA} - h_{f1}}{h - h_{NA}} - (E_f - E_w) A_{f2} \cdot \frac{h_{NA} - h_{f2}}{h - h_{NA}} \cdot E_w b \cdot (h - h_{NA}) - \frac{1}{2} \cdot E_w b \cdot \frac{h_{NA}^2}{h - h_{NA}} = 0 \quad (6)$$

де розміри визначено на рисунку 11, E_f та E_w – модулі пружності композиту та деревини відповідно, A_{f1} та A_{f2} – площі армування на розтяг та стиск відповідно, а ϵ_{f1} та ϵ_{f2} – відповідні члени деформації. Розв'язання цього квадратного рівняння дає розташування нейтральної осі h_{NA} . Збільшення осьової жорсткості композиту на розтяг призводить до переміщення нейтральної осі вниз, тоді як збільшення жорсткості композиту на стиск призводить до переміщення нейтральної осі вгору. Знаючи розташування нейтральної осі, гранична несуча здатність армованого перерізу визначається шляхом визначення моментів сил відносно нейтральної осі.

$$M_u = F_{f1} \cdot (h - h_{NA} - h_{f1}) + F_{f2} \cdot (h_{NA} - h_{f2}) + \frac{2}{3} F_{cw} \cdot (h - h_{NA}) + \frac{2}{3} F_{tw} \cdot h_{NA} \quad (7)$$

Для режиму руйнування 2 максимальна деформація розтягу в деревині, ε_2 , досягає граничного значення, тоді як максимальна деформація стиску, ε_1 , більша за деформацію текучості (рисунок 12).

$$F_{f1} - F_{f2} + F_{cw1} - F_{tw} = 0 \quad (8)$$

Це знову дає квадратичний вираз, який можна розв'язати, щоб знайти розташування нейтральної осі. Гранична місткість моменту потім визначається шляхом визначення моментів нормальних сил відносно нейтральної осі.

$$M_u = F_{f1} \cdot (h - h_{NA} - h_{f1}) + F_{f2} \cdot (h_{NA} - h_{f2}) + \frac{2}{3} F_{cw1} \cdot h_{cy} + \frac{2}{3} F_{cw2} \cdot h_{cy2} + \frac{2}{3} F_{tw} \cdot h_{NA} \quad (9)$$

Ступінь текучості деревини на стиск залежить від відносних величин ε_{tu} та ε_{cy} , а також від кількості арматури, що працює на розтяг та стиск. Збільшення кількості арматури з боку розтягу призводить до більш пластичної поведінки та підвищення міцності. В ідеалі, дерев'яну балку слід розвантажити перед нанесенням композитної арматури. Якщо це неможливо, необхідно врахувати існуючу деформацію в конструкції перед посиленням композитом.

Фундаментальним елементом процесу проектування є вибір відповідних розрахункових значень для властивостей матеріалів. Хоча деякі країни розробили національні рекомендації, наразі не існує європейського стандарту, який би визначав проектування конструкцій з композитів або армування композитами для дерев'яних, сталевих або бетонних конструкцій. Італійська національна дослідницька рада розробила рекомендації [2, 3] щодо армування композитами існуючих конструкцій. Використовуючи підхід граничного стану, розрахункове значення властивості виражається як

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (10)$$

де η – коефіцієнт перетворення, що враховує вплив навколишнього середовища та повзучості, X_k – характеристичне значення, а γ_m – коефіцієнт надійності по матеріалу. Деякі рекомендовані значення коефіцієнта перетворення η з CNR-200 [2] наведено в таблиці 3. CNR-DT200 надає різні коефіцієнти часткової матеріальної складності для композитів залежно від режимів руйнування та типів використовуваних композитних систем. Для розриву композиту γ_m задається як 1,1 для сертифікованих систем та 1,25 для несертифікованих систем.

Таблиця 3 - Коефіцієнти перетворення композитної конструкції η

Композит	Вплив			Режим завантаження	
	Внутрішній	Зовнішній	Агресивний	Повзучість	Втома
Скло / Епоксидна смола	0,75	0,85	0,95	0,30	0,50
Арамід / Епоксидна смола	0,65	0,75	0,85	0,50	0,50
Карбон / Епоксидна смола	0,50	0,70	0,85	0,80	0,50

Основною проблемою проектування армування для існуючих дерев'яних конструкцій є визначення властивостей деревини для використання в проектних розрахунках. Це особливо складно для старих конструкцій. Неруйнівний контроль, що проводиться під час оцінки конструкції перед армуванням, необхідний для отримання характеристичних значень для проектування. Для деревини проектне значення властивості виражається як

$$X_d = k_{mod} \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} \quad (11)$$

де k_{mod} – коефіцієнт модифікації для класів експлуатації та тривалості навантаження, а $X_{k(n)}$ – характеристичне значення властивості, отримане за результатами випробувань на місці. Кілька дослідників [44, 45, 47] виявили, що армовані дерев'яні балки руйнуються на розтяг при більшому напруженні, ніж неармовані балки. Це пояснюється тим, що армування в зоні розтягу

перекриває дефекти, такі як сучки, та обмежує розкриття тріщин, завдяки чому деревина може витримувати більше навантаження до руйнування. Gentile С. та ін. [45] виявили, що залежно від міцності неармованої деревини можна досягти підвищення міцності на розтяг від 18 до 46%.

Для граничного стану експлуатаційної придатності передбачається, що матеріали поведуться пружно. Жорсткість на згин EI армованої балки можна визначити за допомогою методу перетвореного перерізу. Залежно від ситуації, випробування на власне навантаження може бути проведене на неармованій балці для вимірювання неармованої жорсткості на згин. З цього можна розрахувати середній модуль пружності E_w для деревини вздовж волокон, та модульний коефіцієнт n , де

$$n = \frac{E_f}{E_w} \quad (12)$$

У методі перетвореного перерізу розглядається еквівалентний переріз, в якому композитна арматура перетворена на еквівалентну площу деревини. Жорсткість на згин для армованого перерізу потім знаходиться шляхом множення другого моменту перетвореного перерізу на модуль пружності деревини. Максимального збільшення жорсткості на згин можна досягти, розмістивши половину арматури на стискаючій поверхні, а половину - на розтягнутій поверхні [40], однак збільшення порівняно з армуванням лише на розтягнутій поверхні може бути недостатньо значним, щоб виправдати додаткові витрати на матеріали та робочу силу. Збільшення модульного коефіцієнта призведе до більшого збільшення жорсткості на згин. Ефективним методом дослідження різних конфігурацій армування є моделювання методом скінченних елементів, що включає нелінійну поведінку матеріалу для деревини [39, 68].

2.3.2. Зміцнення на зсув

2.3.2.1. Зміцнення на зсув за допомогою зовнішнього армування

Розрахунок армування зсуву відрізняється для неушкоджених поперечних перерізів без тріщин та для пошкоджених елементів. У першому випадку зусилля несуть як деревина, так і композитні елементи, тоді як в другому випадку навантаження в областях елемента з тріщинами несе лише композитний елемент. Як наслідок, процедури проектування відрізняються для обох випадків.

Triantafillou T. [51] узагальнив процедуру проектування для випадку, коли як дерев'яні, так і композитні елементи несуть навантаження пропорційно їхній жорсткості в напрямку осі балок. На додаток до рівняння (12), для спрощення можна використовувати частку площі композиту α_{frp} .

$$\alpha_{frp} = \frac{A_{frp}}{A_{timber}} = \frac{2 \cdot t \cdot h_{frp}}{b \cdot h} \quad (13)$$

де геометричні величини визначені на рисунку 13 та рисунку 14.

Максимальне напруження зсуву в деревині, що виникає внаслідок сили зсуву V , можна розрахувати, вибравши деревину як еталонний матеріал:

$$\alpha_{frp} = \frac{A_{frp}}{A_{timber}} = \frac{2 \cdot t \cdot h_{frp}}{b \cdot h} \quad (14)$$

де ефективні геометричні властивості композитного поперечного перерізу позначені нижнім індексом *comp*. Ефективна ширина композитного поперечного перерізу дорівнює:

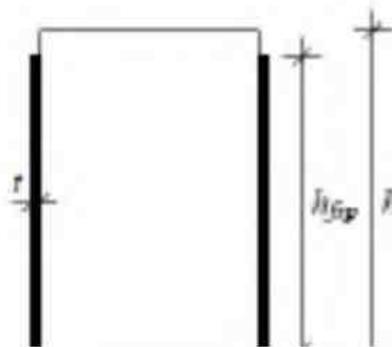
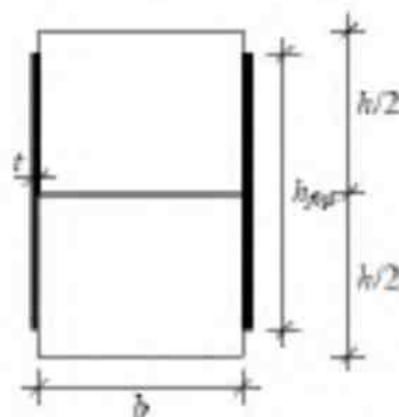


Рисунок 14 - Поперечний переріз неушкодженої деревини

Рисунок 13 - Тріснутий поперечний переріз деревини

$$b_{comp} = b + 2tn = b_{timber} \left(1 + n \frac{h}{h_{frp}} \alpha_{frp} \right) \quad (15)$$

Ефективний момент інерції складеного поперечного перерізу становить:



$$I_{comp} = \frac{bh^3}{12} + \frac{2nth_{frp}^3}{12} = I_{timber} \left[1 + n \left(\frac{h_{frp}}{h} \right)^2 \alpha_{frp} \right] \quad (16)$$

а ефективний статичний момент площі в центрі складеного поперечного перерізу дорівнює:

$$S_{comp,max} = b \frac{h}{2} \frac{h}{4} + 2nt \frac{h_{frp}}{2} \frac{h_{frp}}{4} = S_{timber,max} \left(1 + n \frac{h_{frp}}{h} \alpha_{frp} \right) \quad (17)$$

Отже, напруження в деревині згідно з рівнянням (14) можна розрахувати наступним чином:

$$\tau_{timber,max} = \frac{VS_{timber,max}}{b_{timber}I_{timber}} \cdot \frac{1 + n \frac{h_{frp}}{h} \alpha_{frp}}{1 + n \frac{h}{h_{frp}} \alpha_{frp}} \cdot \frac{1}{1 + n \left(\frac{h_{frp}}{h} \right)^2 \alpha_{frp}} \quad (18)$$

І, отже, максимальні напруження зсуву в композиті становлять:

$$\tau_{frp,max} = n\tau_{timber,max} \quad (19)$$

Використовуючи рівняння (12), кількість (площа, що становить α_{frp}) та властивості (n) композиту можна скоригувати, щоб зменшити напруження зсуву в деревині та задовольнити міцність композиту на зсув. Для хорошого армуючого ефекту композитного ровінгу слід наносити під кутом менше 90° відносно напрямку волокон деревини. Widmann R. та ін. [58] повідомили про хороші показники при куті 45° між волокнами композиту та волокнами деревини. Крім того, необхідно перевірити напруження в лінії з'єднання.

У випадку пошкодження балки внаслідок розтріскування від зсуву в центрі поперечного перерізу (рисунок 14), зсув передається лише композиту. Для ідеального армування повне напруження зсуву має сприйматися композитом. Однак насправді армуючий ефект, що з'єднує верхню та нижню частини балки, не буде ідеально жорстким, і, отже, результатом буде зменшення переданих сил зсуву. Арматура з низькою жорсткістю, така як композитний ровінг, перпендикулярний до волокон, не зможе передавати навантаження між дерев'яними елементами та не сприятиме жорсткості балки. Дві частини балки діятимуть окремо, як окремі елементи. Отже, перевагу слід надавати похилому застосуванню, як описано Widmann R. та ін. [58]. Оцінку максимальних напружень, що діють у композиті, можна зробити, припускаючи ідеально жорстку арматуру, де напруження зсуву в місці розташування тріщини повністю сприймаються композитом.

Піки напружень виникають у лінії зчеплення між скловолокном та деревиною поблизу тріщини зсуву. Забезпечення цілісної лінії зчеплення має вирішальне значення для досягнення оптимального ефекту армування. Особливу увагу слід приділяти довгостроковій поведінці лінії зчеплення під впливом коливань вологості та змін умов навколишнього середовища. Стрункість листів скловолокна разом з високою жорсткістю може спричинити високі напруження розтягу в ламінаті у разі набухання деревини або вигинання внаслідок стиснення у разі усадки деревини.

2.3.2.2. Зміцнення на зсув за допомогою внутрішнього армування

Внутрішнє армування композитними стрижнями діє локально вздовж осі балки. У непошкодженому поперечному перерізі розподіл напружень зсуву змінюється лише в армованій зоні. Для проектування непошкоджених поперечних перерізів внутрішнім армуванням композитами слід знехтувати. Аналогічні міркування, як і для армування за допомогою саморізів [69], можна зробити також для композитних стрижнів. Через низьку відносну частку композиту порівняно з поперечним перерізом деревини, вплив армування на

жорсткість можна вважати низьким. Тим не менш, композитні стрижні можуть бути адекватним заходом для армування пошкоджених балок зі зсувними тріщинами. Композитні стрижні повинні бути розроблені для сприйняття сил, що діють між верхньою та нижньою частинами деревини. У літературі більшість випробувань проводилися з композитними стрижнями, встановленими перпендикулярно до волокон, однак, слід вибрати нахил, щоб скористатися високою міцністю на розтяг армуючих елементів. Svecova D. та Eden R.J. [55] спостерігали хороший ефект армування з відстанню між штифтами, що дорівнює глибині балки, у своїх випробуваннях.

2.3.3. Тривалі деформації деревини та композитів

2.3.3.1. Огляд

Дерев'яні конструкції схильні до тривалих деформацій через повзучість, яка посилюється за наявності вологи та особливо її коливань, відомих як механосорбційна повзучість. Армуючи деревину матеріалом, який має чудові властивості короткочасної та довготривалої жорсткості, можна покращити довгострокову поведінку та зменшити прогин. Перші записи про прискорену повзучість деревини через зміну умов вологості були описані в 1960-х роках [70]. Ці записи пізніше були перевірені шляхом проведення випробувань на вигин невеликих зразків деревини як за циклічної, так і за постійної вологості [71]. Зразки, що піддаються постійній вологості, демонструють майже постійну швидкість повзучості. Для циклічної вологості прогини змінюються з циклами сушіння та зволоження, але загальний прогин збільшується з кожним циклом. Для вищих швидкостей напруження швидкість прогину значно зростає за наявності циклічної вологості.

Зазвичай, не очікується, що волокна в композитних матеріалах будуть значно повзучими. Загальновідомо, що повзучість зразків, навантажених у напрямку волокон, є незначною [72]. З іншого боку, смоли та клеї демонструють виражені реологічні властивості (в'язкі властивості), зазнаючи значної повзучості, на яку сильно впливає температура. Для покращення

довгострокових властивостей двокомпонентних епоксидних клеїв було проведено дослідження, в якому відливали зразки епоксидної смоли у формі «собачої кістки» [73]. Половина зразків була армована 0,5% вуглецевого волокна. Ці зразки мали швидкість повзучості на 38% нижчу, ніж неармовані зразки.

2.3.3.2. Експериментальне випробування на повзучість масивної деревини, зміцненої композитами

Випробування на повзучість неармованих та армованих зразків балок проводилися в Технологічному університеті Чалмерса [74]. У дослідженні було використано 24 зразки з поперечним перерізом 45×70 мм та довжиною 1,1 м. Щоб мінімізувати мінливість властивостей матеріалу, зразки були чітко визначені з точки зору походження сировини та схеми розпилювання [75]. Зразки були розподілені на чотири різні групи з приблизно однаковим середнім значенням та стандартним відхиленням модуля пружності. Різні схеми армування показані в таблиці 4. Були використані два типи вуглецевого волокна, а саме CFK 150/2000 (CFRP 165) від S&P та CarboDur H514 (CFRP 300) від Sika. Не очікувалося повзучості ні в арматурі з вуглецевого волокна, ні в сталі, оскільки вона була навантажена в напрямку волокон. У всіх випадках використовувався клей S&P Resin 220 Ероху. Щоб забезпечити вологообмін на трьох частинах поперечного перерізу, поверхні розтягу незміцнених дерев'яних зразків були герметизовані епоксидною смолою.

Типи балок				
	Деревина	CFRP 165	CFRP 300	Сталь
Схеми зміцнення	Герметично захищено епоксидною смолою	CFK 150/2000*	CarboDur H514**	Сталь
Площа армування [мм ²]	-	70	70	100

Модуль пружності [ГПа]	-	165	300	210
Міцність на розтяг [МПа]	-	2310	1350	235
* Продукт для зміцнення на згин Sto S&P (пластини)				
** Продукт Sika Chemicals для зміцнення на вигин (пластини)				

Випробування на повзучість проводилися методом чотириточкового згину при рівні напруження 8 МПа. Безпосередньо після навантаження зразків клімат було встановлено на 90% відносної вологості, після чого клімат змінювався між 30% відносної вологості та 90% відносної вологості протягом двох тижнів, при цьому температура в приміщенні підтримувалася постійною на рівні 23°C. Кривизну середньої точки вимірювали за допомогою LVDT-гейджів. Результати показали, що армовані зразки мали менший початковий прогин, ніж неармовані зразки. Цей результат був очікуваним через вищу жорсткість армованих зразків. Результати повзучості були представлені як відносна повзучість, тобто прогин, поділений на початковий прогин (після 60 секунд). Середні значення відносної повзучості з усіх серій показано на рисунку 15.

Різниця відносної повзучості між вологим та сухим періодами дуже велика, набагато вища для армованих зразків, ніж для неармованих. Для армованих зразків коливання між 90% та 30% відносної вологості має таку ж величину, як і початковий прогин. Це спричинено поздовжнім усиханням деревини, тоді як армуючий матеріал не стискається. Цей ефект набагато більший, коли використовувалося одностороннє армування. Висновок полягає в тому, що армуючий матеріал повинен бути розподілений як на розтягнутій, так і на стискаючій стороні балок. Лінії тренду на рисунку 16 були розраховані шляхом підсумовування початкового та кінцевого значень для кожного 2-тижневого періоду. Тенденція чітко показала, що армування досить добре запобігає механосорбційній повзучості. Після перших 4 тижнів збільшення відносної повзучості для сталевих та армованих CFRP 300 зразків становить лише чверть від збільшення для деревини з епоксидною смолою.

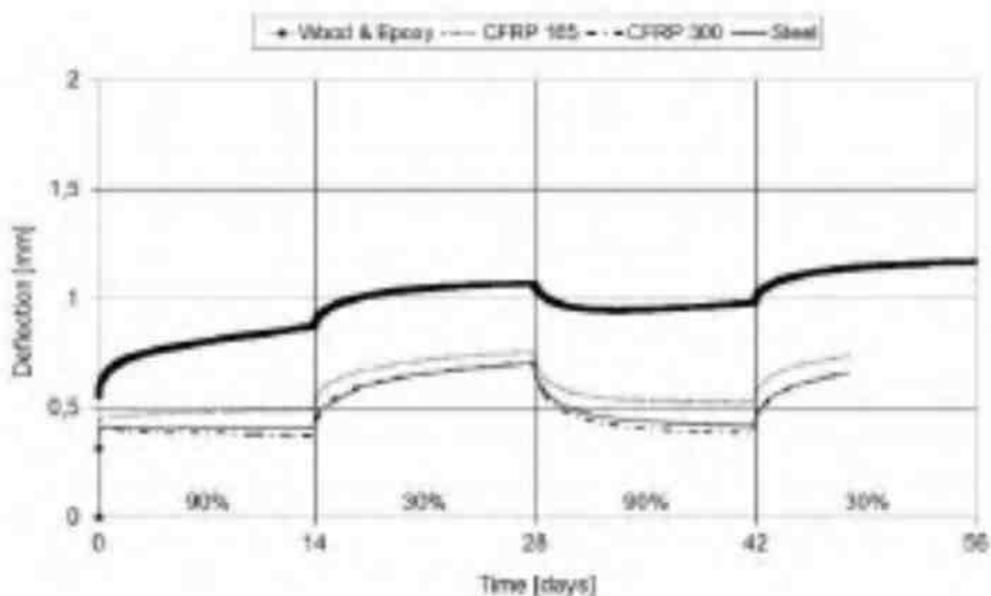


Рисунок 15 - Середня відносна повзучість для чотирьох різних схем армування

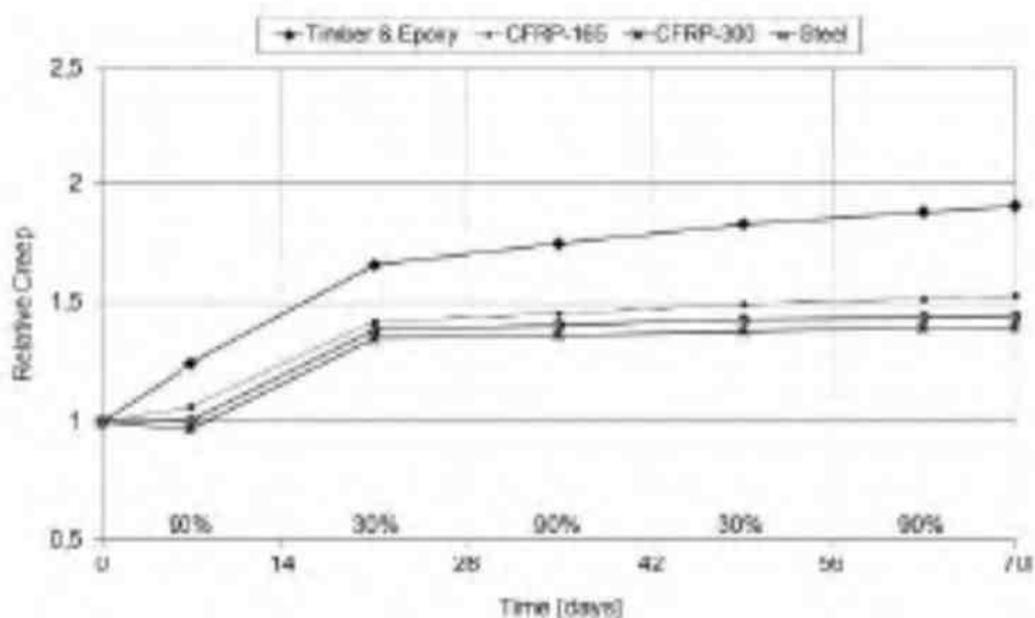


Рисунок 16 - Лінії тренду середньої відносної повзучості для чотирьох різних схем армування

2.3.3.3. Аспекти розрахунку

Щоб мінімізувати механосорбційну повзучість, корисно посилювати як розтягнуту, так і стиснуту сторони дерев'яної балки, щоб уникнути значних рухів, викликаних вологою. EC5 не надає коефіцієнтів k_{def} для балок, посилених композитами. Однак основна перевага полягає у підвищеній короткочасній жорсткості посилених балок, але довгострокові деформації повзучості такі ж, як і для непосилених балок. Потрібні додаткові дослідження

для вивчення різних кліматичних класів та тривалості навантаження для певної стандартизованої системи посилення. Розрахунок прогину для армованої балки (з армуванням близько 2%) у житловому будинку показав, що можна збільшити довжину прольоту на цілих 20% або зменшити розмір поперечного перерізу порівняно з неармованою балкою.

2.4. Контроль якості склеювання на місці

Успіх армування залежить від впровадження належних заходів контролю якості на кожному етапі процесу. Усі роботи повинні виконуватися персоналом з відповідним досвідом з використанням відповідних матеріалів, процедур та обладнання відповідно до Плану якості. Процедура контролю якості на місці була розроблена в рамках проекту EC CRAFT LICONS [76]. Згодом її було прийнято в рамках дії COST E34 [16]. Проекти стандартів для приймальних випробувань, змішування та нанесення клеїв на місці були підготовлені CEN TC 193/SC1/WG11 [7, 8, 77, 78].

Ці групи рекомендували, щоб План якості включав наступні перевірки та визначав частоту кожної перевірки/випробування.

1. Прийом матеріалів: Слід вести облік усіх матеріалів, доставлених на об'єкт. Матеріали слід перевірити на відповідність специфікаціям, а також на термін придатності.

2. Огляд та випробування

а) Елементи, що підлягають ремонту: слід перевірити та зафіксувати вологість деревини, стан поверхні склеювання, а також розміри та розташування отворів, щілин тощо.

б) Змішування та нанесення клеїв: слід провести наступні випробування відповідно до проектів стандартів [7, 8, 77, 78]

- Відбір проб на місці та вимірювання графіка затвердіння клеїв
- Відбір проб на місці та подальше лабораторне вимірювання міцності клейових з'єднань на зсув

- Відбір проб на місці та контрольне навантаження міцності клейових з'єднань

с) Візуальний огляд остаточного ремонту, включаючи перевірку розмірів.

На основі цих випробувань фактичні властивості, отримані на місці, можна порівняти зі значеннями, використаними в проекті.

2.5. Перспективи та рекомендації

Використання склеєних полімерних елементів, армованих волокнами, для зміцнення та ремонту дерев'яних конструкційних елементів виявилось ефективним та економічним методом. Висока міцність і жорсткість, легка вага та хороші властивості довговічності композитів, а також переваги клейового склеювання зробили його придатною альтернативою традиційним методам зміцнення та ремонту. Обговорюються композитні матеріали та клеї, а також їхні властивості, придатні для різних методів. Зазначається, що ретельна підготовка поверхні є важливою для досягнення хорошої міцності та довговічності зчеплення.

Двокомпонентні епоксидні клеї холодного затвердіння, як правило, є найбільш придатними для склеювання на місці, оскільки вони мають хороші властивості заповнення зазорів та низьку усадку при затвердінні. Зазначається, що ретельна підготовка поверхні є важливою для досягнення гарної міцності та довговічності зчеплення. Дослідження поведінки зчеплення композитів з деревиною все ще перебуває на початковій стадії. Потрібні додаткові дослідження, зосереджені, зокрема, на різних факторах, що впливають на зчеплення між композитом та деревиною, включаючи комбіновані властивості та локальне співвідношення зчеплення та ковзання для композиту з деревиною, які можна використовувати безпосередньо для аналізу методом скінченних елементів.

Представлено підхід до проектування, який враховує руйнування та розшарування при посиленні композитами, включаючи відповідні моделі

матеріалів. Обговорюються критерії міцності на основі режиму руйнування, а розробка, зроблена Рук А., показана з точки зору математичного формулювання та показників міцності для критерію руйнування Пака-Кнауста. Представлені застосування пов'язані з армуванням торців балок, покращенням міцності на розтяг, перпендикулярного до волокон, армуванням зсуву та попереднім напруженням композиту на стороні розтягу балки при згинанні.

Армування торців балок є дуже важливим методом ремонту пошкоджених частин конструкції, а саме реставрації історично значущих споруд. Повідомлялося про збільшення конструкційних характеристик на 140% для доповнень з дерева. Дослідження провисання арматури балок при згинанні та зсувній арматурі коротко підсумовані, оскільки дослідження такого роду проводилися протягом багатьох років і доступна велика кількість досліджень. Попереднє напруження композитних матеріалів на розтягнутій стороні балки при згинанні пропонує найефективніше використання цих матеріалів; збільшуючи несучу здатність та попереднє вигинання існуючих балок, і, таким чином, покращуючи граничний стан експлуатаційної придатності, який часто визначає конструкцію.

Визнано, що однією з головних проблем, коли йдеться про проектування армованих дерев'яних елементів у граничному стані, є відсутність відповідних властивостей деревини, зокрема старих дерев'яних конструкцій. Максимального збільшення жорсткості на згин (у граничному стані експлуатаційної придатності) можна досягти, розмістивши половину арматури на стискаючій поверхні, а половину - на розтягнутій. Немає коефіцієнтів повзучості для довготривалого прогину, як визначено в нормах проектування для дерев'яних балок, посиленних на згин, тому неможливо скористатися перевагами нижчої механосорбційної повзучості, ніж у незміцнених балках. Загалом, потрібні додаткові дослідження довготривалих випробувань та показників довговічності, щоб врахувати вплив змін вологості та умов навколишнього середовища. Визнається необхідність належного

контролю якості склеювання на будівельному майданчику, і представлено план якості, заснований на різних стандартах.

Предметом цієї роботи є дослідження напружено-деформованого стану (НДС) дерев'яних конструкцій, що зазнають згин, посилені армуванням полімерними композитами.

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КЛЕЄНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ СКЛОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ

Деревина є анізотропним матеріалом, її механічні властивості значно змінюються в залежності від кута нахилу до волокон. Для зручності розрахунку конструкцій, приймається допущення про ортогональної анізотропії деревини - ортотропними. Це прийнято в якості спрощеної розрахункової схеми і засноване на гіпотезі про наявність трьох площин симетрії в елементарному обсязі деревини, перпендикулярних тангенціальному, трансверсальному і радіальному напрямках волокон і докладно описано.

Деревині, як конструкційному матеріалу, властиво змінювати свій напружено-деформований стан з плином часу при постійному навантаженні. У деревині розрізняють миттєві і в'язкі деформації. Якщо миттєві деформації відбуваються в момент прикладання навантаження, то в'язкі розвиваються під дією навантаження. До певного рівня напружень деревина працює, як пружний матеріал, при перевищенні цієї величини в деревині починають розвиватися пластичні деформації, які при досягненні граничного значення призводять до руйнування конструкції. Для деревини, як і для залізобетону, характерний ефект релаксації – перерозподіл напружень в конструкції з плином часу при постійному навантаженні.

Існуючі методи розрахунку дозволяють з достатньою точністю визначати несучу здатність і жорсткість армованих дерев'яних конструкцій на всіх стадіях їх роботи. Стадії напружено-деформованого стану таких

конструкцій при згині показані на рисунку 17 і, хоча розрахунок таких конструкцій ведеться з урахуванням тільки пружної роботи деревини і армуючого компонента, стадії роботи деревини включають в себе також пружно-пластичну стадію і стадію руйнування. На першій стадії роботи конструкції (рисунок 17а) відносні деформації деревини і арматури не перевищують граничних значень пружних деформацій $\varepsilon_d(\varepsilon_k) \leq \varepsilon_{гр}$. Слід зазначити, що з ростом навантаження лінійна залежність між деформаціями і напруженнями в деревині кілька порушується, особливо це характерно при стисканні (рисунок 18), тому перша стадія НДС розглядається як умовно-пружна. На рисунку 18 зображені діаграми роботи деревини при розтягу і стисненні, де по осі ординат вказані частки від руйнівного напруження (φ_t, φ_c), а по осі абсцис – відповідні їм відносні деформації (ε).

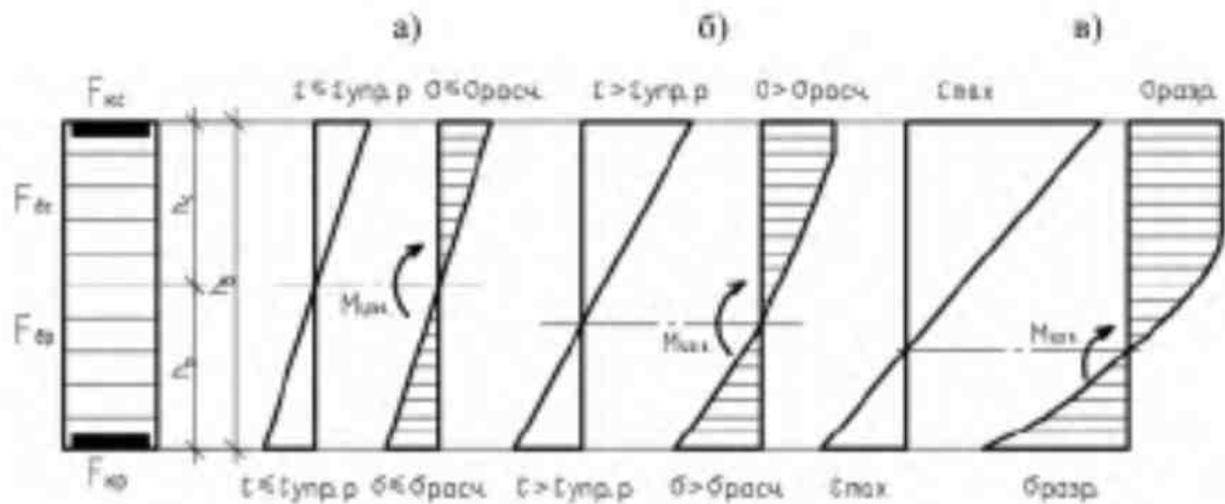


Рисунок 17 - Стадії НДС армованих дерев'яних конструкцій при згині
 а – пружна стадія; пружно-пластична стадія; в – стадія руйнування

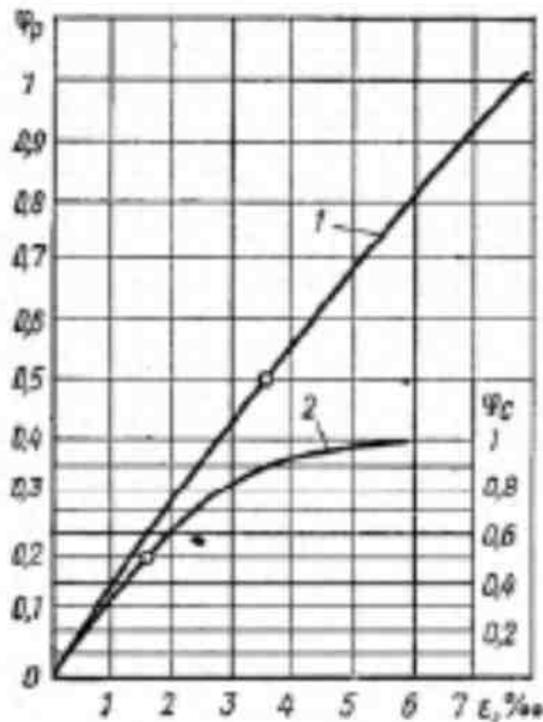


Рисунок 18 - Діаграма роботи деревини на розтяг і стиснення

При пружно-пластичній роботі проявляються істотні пластичні деформації в стислій зоні балки, пластична зона від краю зміщується до середини перерізу. Це в свою чергу сприяє перерозподілу зусиль в балці і зміщення нейтральної лінії до розтягнутих волокон. Деформації розтягнутої зони зростають до межі пропорційності.

На стадії руйнування відзначається істотне зростання деформацій при незначному збільшенні навантаження. Конструкція руйнується від розриву розтягнутих волокон. Необхідно відзначити, що в балках з великою висотою поперечного перерізу, при відсутності заходів підвищення зсувної міцності, підвищується ризик руйнування балки від сколювання ще до досягнення пружно-пластичної стадії роботи.

На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** зображені діаграми робіт стали і армуючих волокон полімерних композитів, які використовуються для підсилення дерев'яних конструкцій.

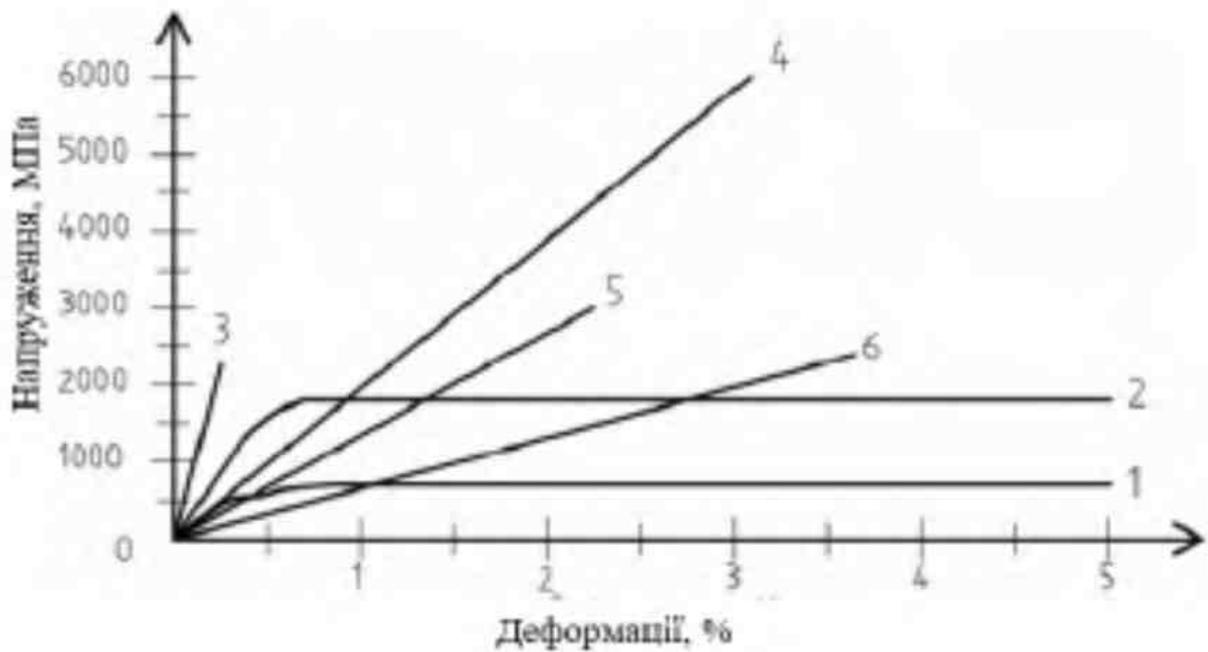


Рисунок 19 - Діаграма роботи армуючих матеріалів

1 – сталь звичайна; 2- високоміцна сталь; 3 – HM вуглеволокно;
4- HS вуглеволокно; 5 – арамідоволокно; 6 – E скловолокно

Міцність волокон істотно перевершує міцність як звичайної, так і високоміцної сталі. З діаграми на рисунку 19 також видно, що у армуючих волокон відсутня стадія плинності і протягом всього періоду навантаження зберігається лінійна залежність між напруженнями і деформаціями.

Для проектування армування конструкції використовують приведені геометричні характеристики перерізу, які приводять до найбільш напруженого матеріалу конструкції – деревині, через коефіцієнт приведення. Розрахунок таких конструкцій ведуть за двома групами граничних станів. Приведені характеристики підсиленого перерізу слід визначати в наведеній нижче послідовності.

Визначаємо коефіцієнт приведення n :

$$n = \frac{E_k}{E_d} \quad (20)$$

де E_k – модуль пружності полімерного композиту;

E_d – модуль пружності деревини

Визначається площа приведеного перерізу A_r :

$$A_r = A_d + n \cdot \sum_{i=1}^m A_{ki} \quad (21)$$

де A_d – площа поперечного перерізу дерев'яного елемента;

A_{ki} – площа поперечного перерізу полімерного композиту;

m – кількість елементів із полімерного композиту, прийняте для підсилення.

Призначається грань перерізу, відносно якої буде обчислюватися приведений статичний момент інерції підсиленого перерізу S_r^0 . Рекомендується обчислювати його відносно нижньої грані перерізу, як показано на рисунку 20. В загальному випадку приведений статичний момент інерції визначається за формулою:

$$S_r^0 = A_d \cdot h_d + n \cdot \sum_{i=1}^m A_{ki} \cdot h_i \quad (22)$$

де h_d – відстань від обраної грані перерізу до центра ваги перерізу дерев'яного елемента;

h_i – відстань від обраної грані перерізу до центра ваги перерізу полімерного композиту.

Відстань y_0 від обраної грані до нейтральної осі підсиленого перерізу визначається за формулою (23).

$$y_0 = \frac{S_r^0}{A_r} \quad (23)$$

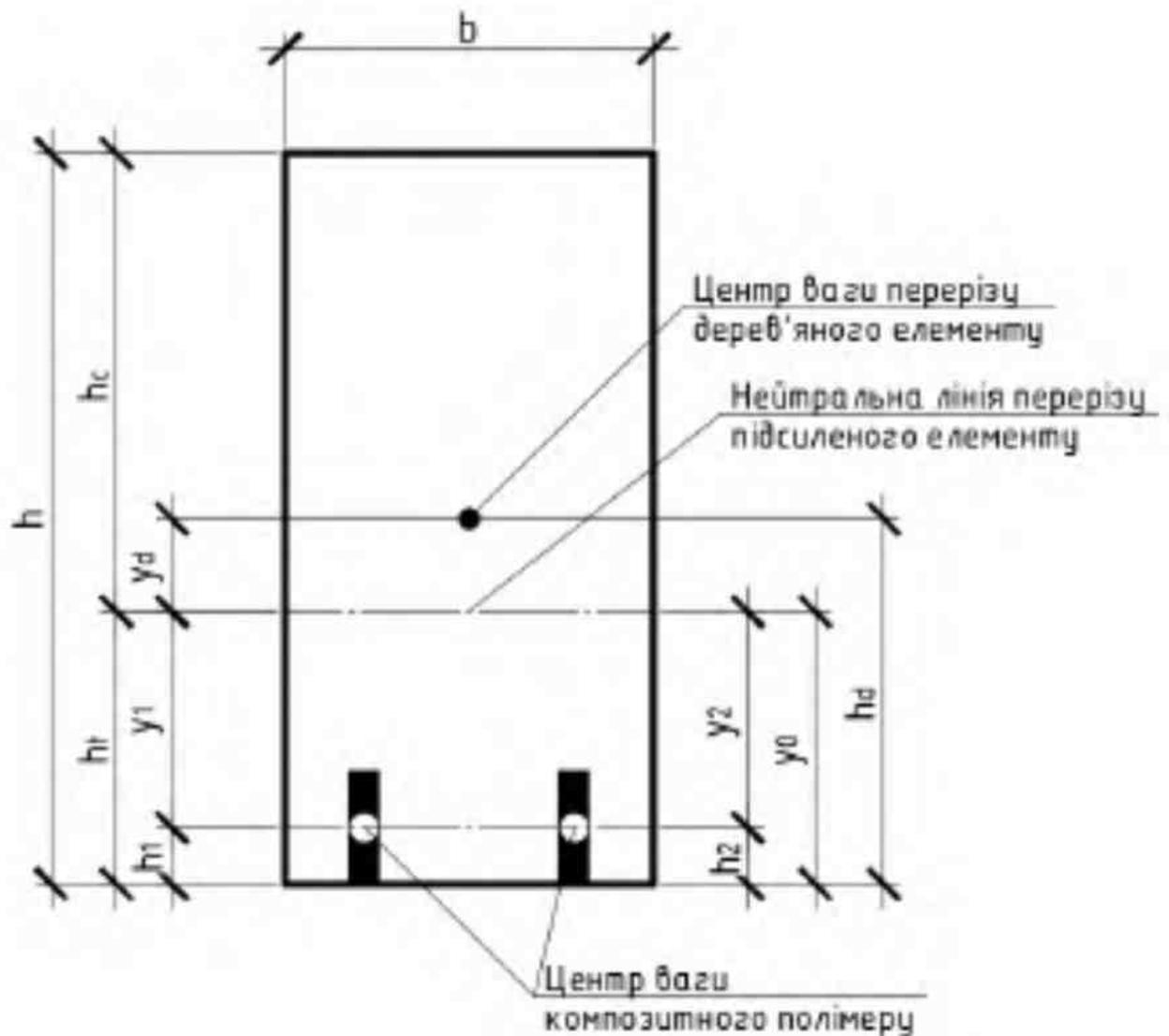


Рисунок 20 - Схема визначення основних параметрів для визначення приведених геометричних характеристик підсиленого перерізу

Момент інерції приведенного перерізу I_r в загальному вигляді має вигляд:

$$I_r = I_d + n \cdot \sum_{i=1}^m I_{ki} \quad (24)$$

де I_d – момент інерції дерев'яного перерізу (25) відносно нейтральної осі перерізу;

I_{ki} – момент інерції перерізу полімерного композиту (26) відносно нейтральної осі перерізу.

$$I_d = I_{d0} + A_d \cdot y_d^2 \quad (25)$$

де I_{d0} – момент інерції дерев'яного перерізу відносно особистого центру ваги;

y_d – відстань від особистого центра ваги дерев'яного перерізу до нейтральної осі підсиленого перерізу.

$$I_{ki} = I_{k0i} + A_{ki} \cdot y_i^2 \quad (26)$$

де I_{k0i} – момент інерції перерізу полімерного композиту відносно особистого центру ваги;

y_i – відстань від особистого центра ваги перерізу полімерного композиту до нейтральної осі підсиленого перерізу.

Приведений момент опору визначається для стиснутої і розтягнутої зон перерізу за формулами (27) і (28) відповідно.

$$W_r^c = \frac{I_r}{h_c} \quad (27)$$

де h_c – висота стиснутої зони перерізу.

$$W_r^t = \frac{I_r}{h_t} \quad (28)$$

де h_t – висота розтягнутої зони перерізу.

При розрахунку також необхідно враховувати вплив умов експлуатації, які враховуються відповідними коефіцієнтами з діючих будівельних норм, і ряд таких припущень:

- однаковий модуль пружності деревини при стисненні і розтягуванні;
- перерізи конструкції плоскі до деформації залишаються плоскими і після деформації;
- деформації деревини і армуючого матеріалу сумісні і однакові.

Основне завдання підсилення – підвищення несучої здатності і зниження деформативності несучих елементів. Відомо безліч технічних рішень щодо підсилення ДК. Найбільш сучасне і перспективне з них – підсилення ДК поздовжнім армуванням полімерними композитами. Висока вартість композитів компенсується їх достатньою ефективністю і іншими

перевагами. Часто даний метод є єдиною можливим для збереження вихідних конструкцій, їх первісного вигляду в будівлях, що представляють культурну та історичну цінність.

Після вибору схеми підсилення і обчислення приведених геометричних характеристик розрахунок підсиленої конструкції ведуть по всіх можливих видів руйнування. Необхідно відзначити, що підсилення полімерним композитом конструкцій, що зазнають згин, які перебувають під впливом деяких навантажень, буде ефективним лише для подальших навантажень, тому для досягнення максимального ефекту від підсилення рекомендується проводити роботи при повному розвантаженні конструкції. Розрахунок підсилення ненавантажених конструкцій, що зазнають згин, за першою групою граничних станів проводиться за формулами (29)-(33).

Перевірка на міцність деревини стиснутої зони елемента, що зазнає згин:

$$\sigma_{m,y,d}^c = \frac{M}{W_r^c} \leq f_{m,y,d} \quad (29)$$

де M – розрахунковий згинальний момент;

$f_{m,y,d}$ – розрахунковий опір деревини згину відносно осі Y .

Перевірка на міцність деревини розтягнутої зони елемента, що зазнає згин:

$$\sigma_{m,y,d}^t = \frac{M}{W_r^t} \leq f_{m,y,d} \quad (30)$$

Перевірка на міцність деревини на дію максимальної поперечної сили:

$$\tau_{d,v} = \frac{Q \cdot S_r}{I_r \cdot b} \leq f_{v,d} \quad (31)$$

де Q – значення поперечної сили;

S_r – приведений статичний момент частини перерізу, що зсувається;

b – розрахункова ширина перерізу дерев'яного елемента;

$f_{v,d}$ – розрахункове значення опору деревини сколюванню.

Перевірка на міцність полімерного композита:

$$\sigma_k = n \cdot \frac{M}{W_r} \leq f_k \quad (32)$$

де f_k – розрахунковий опір полімерного композита розтягу.

Перевірка на міцність по сколювання клейового шва «деревина - полімерний композит»:

$$\tau_{k,v} = \frac{Q \cdot S_r^k}{I_r \cdot b_k} \leq f_{ng,0,d} \quad (33)$$

де S_r^k – приведений статичний момент полімерного композиту відносно нейтральної осі;

b_k – ширина клейового шва «деревина – композит», що сприймає зусилля зсуву;

$f_{ng,0,d}$ – розрахунковий опір деревини місцевому сколюванню вздовж волокон для клейового з'єднання.

Розрахунок за другою групою граничних станів зводиться до обчислення максимальних прогинів w_{fin} конструкції від прикладеного навантаження і порівняння їх з граничними допустимими f_u , які регламентовані будівельними нормами [79].

$$w_{fin} \leq f_u \quad (34)$$

Для визначення ефективності підсилення поздовжнім армуванням був проведений розрахунок вертикальних деформацій дерев'яної балки перекриття прольотом 6 м з поперечним перерізом 120×400 мм, модулем пружності $E = 10000$ МПа [80] і завантаженої рівномірно розподіленим навантаженням $q = 7.5$ кН/м.

Були визначені деформації прогинів в середині прольоту балки без підсилення і балок з симетричним армуванням склопластиковими стрижнями діаметром 20 мм і модулем пружності при розтягуванні $E = 50000$ МПа (рисунок 21, а) і вуглепластиковими ламелями перерізом 1,4×50 мм і модулем пружності $E = 170000$ МПа (рисунок 21, б). Матеріали для армування та їх характеристики міцності були обрані відповідно до сортаменту продукції, що

випускається підприємствами. Коефіцієнти армування балки відповідно склали - $\mu = 3.14\%$ і $\mu = 0.875\%$.

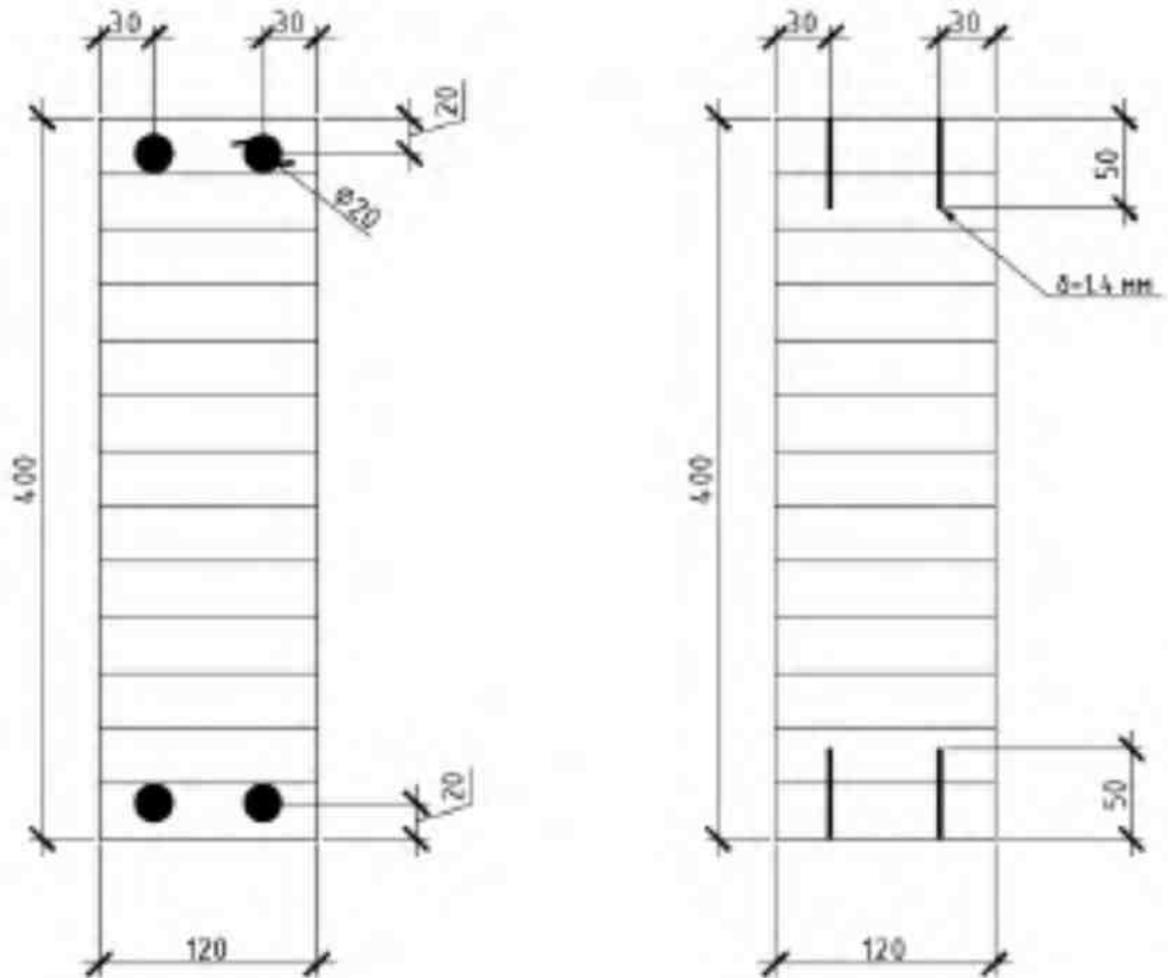


Рисунок 21 - Поздовжнє армування балки

а – склопластиковою арматурою ($\mu = 3.14\%$);

б – ламелями із вуглепластику ($\mu = 0.875\%$)

Моделювання та аналіз роботи конструкції в розрахункових програмних комплексах в більшості випадків дозволяє уникнути численних дорогих випробувань, обмежуючись лише вибірковими випробуваннями оптимізованого об'єкта дослідження.

Числові дослідження в даній роботі виконані в універсальному програмному комплексі Лира-САПР

Мета чисельних досліджень в даній роботі – вивчити напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій при їх спільній роботі з полімерними композитними матеріалами.

На початковому етапі задавалися фізичні характеристики та жорсткість матеріалів з урахуванням їх ортотропності, напрямом головних осей яких показано на рисунку 22. Для деревини характеристики наведені в Таблиця 4 і прийняті згідно з діючими нормами [80]. Відсутні значення коефіцієнта Пуассона ν_{xy} для деревини прийнятий з наукової роботи Глухих В.Н. і Черних А.Г. Характеристики для композитних матеріалів, використовуваних в розрахунку, прийняті за діючими нормативами і наведені в Таблиця 5.



Рисунок 22 - Напрямок головних осей в дерев'яному елементі

Таблиця 4. Характеристики деревини, що використовуються при розрахунку.

Назва характеристики	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Щільність	ρ	кг/м ³	500
Модуль пружності X	E_x	кН/см ²	1000
Модуль пружності Y	E_y	кН/см ²	400
Модуль пружності Z	E_z	кН/см ²	400
Коефіцієнт Пуассона XY	ν_{xy}	-	0.018
Коефіцієнт Пуассона YZ	ν_{yz}	-	0.3
Коефіцієнт Пуассона XZ	ν_{xz}	-	0.018
Модуль зсуву XY	G_{xy}	кН/см ²	50

Назва характеристики	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Модуль зсуву YZ	G_{yz}	кН/см ²	8
Модуль зсуву XZ	G_{xz}	кН/см ²	50

Таблиця 5. Характеристики композитів, що використовуються при розрахунку

Назва характеристики	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Ламелі із вуглепластику			
Щільність	ρ	кг/м ³	1600
Модуль пружності X	E_x	кН/см ²	23000
Модуль пружності Y	E_y	кН/см ²	945
Модуль пружності Z	E_z	кН/см ²	945
Коефіцієнт Пуассона XY	ν_{xy}	-	0,0122
Коефіцієнт Пуассона YZ	ν_{yz}	-	0,4
Коефіцієнт Пуассона XZ	ν_{xz}	-	0,0122
Модуль зсуву XY	G_{xy}	кН/см ²	550
Модуль зсуву YZ	G_{yz}	кН/см ²	390
Модуль зсуву XZ	G_{xz}	кН/см ²	550
Арматура склопластикова			
Щільність	ρ	кг/м ³	2000
Модуль пружності X	E_x	кН/см ²	5000
Модуль пружності Y	E_y	кН/см ²	800
Модуль пружності Z	E_z	кН/см ²	800
Коефіцієнт Пуассона XY	ν_{xy}	-	0,048
Коефіцієнт Пуассона YZ	ν_{yz}	-	0,4
Коефіцієнт Пуассона XZ	ν_{xz}	-	0,048
Модуль зсуву XY	G_{xy}	кН/см ²	500
Модуль зсуву YZ	G_{yz}	кН/см ²	354,6
Модуль зсуву XZ	G_{xz}	кН/см ²	500

Досліджувані моделі прийняті розмірами 100×350×3200 мм

Моделювання конструкції виконуємо об'ємними скінченими елементами. Розмір елемента прийmemo 10×10×10 мм. Жорсткість об'ємних елементів задаємо з урахуванням ортотропії матеріалу різним в трьох напрямках дії зусиль. Завантажимо двома зосередженими силами на відстані $1/3l$ від опори. Навантаження прикладаємо по грані об'ємного елемента.

Інтенсивність навантаження повинна бути еквівалентною прикладеній зосередженій силі. Оскільки ширина балки прийнята 100 мм, а ширину розподільчої пластини для прикладання навантаження прийнято 10 мм, то для визначення інтенсивності величину зосередженої сили необхідно поділити на вантажну площу $A = 0,1 \cdot 0,01 = 0,001 \text{ м}^2$. Схема прикладення навантаження наведена на рисунку 23.

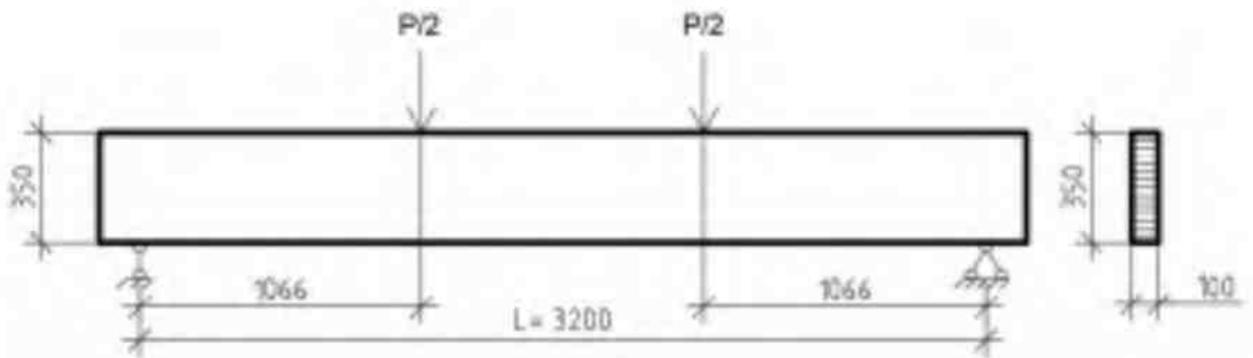


Рисунок 23 - Схема прикладення навантаження

Враховуюче вище наведені фактори отримаємо розрахункову схему, наведену на рисунку 24

Рисунок 24

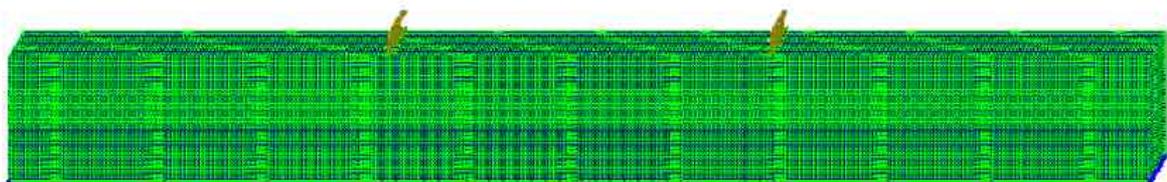


Рисунок 24

Рисунок 24 - Розрахункова схема шарнірно опертій балки, змодельованої об'ємними скінченими елементами

За результатами розрахунку отримаємо напруження (рисунок 26) і деформації (рисунок 25) балки, причому розрахунок проведемо для трьох

варіантів балки: суцільна балка, симетрично армована балка склопластиковою арматурою і симетрично армована балка вуглепластиковими ламелями.

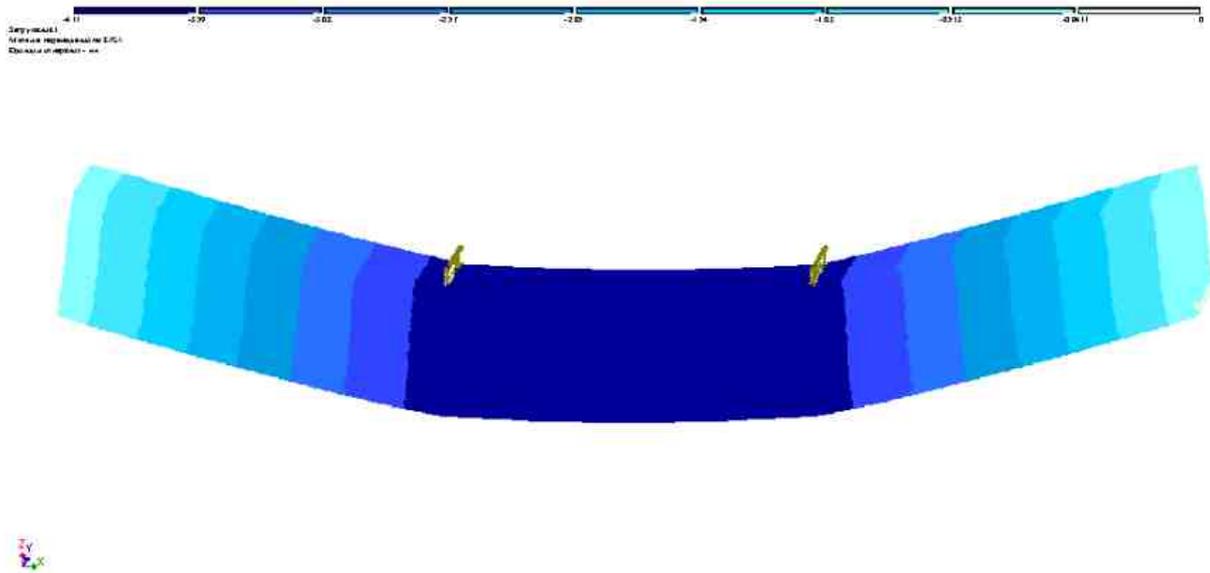


Рисунок 25 - Деформована схема балки з мозаїкою деформацій

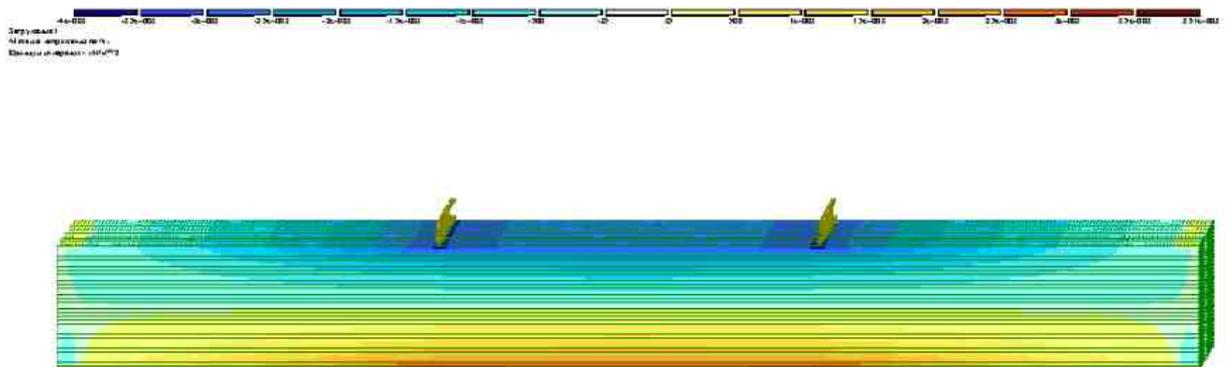


Рисунок 26 - Ізополя напружень в дерев'яній клеєній балці

Результати розрахунку для виконання порівняння нанесемо на графік (рисунок 27).

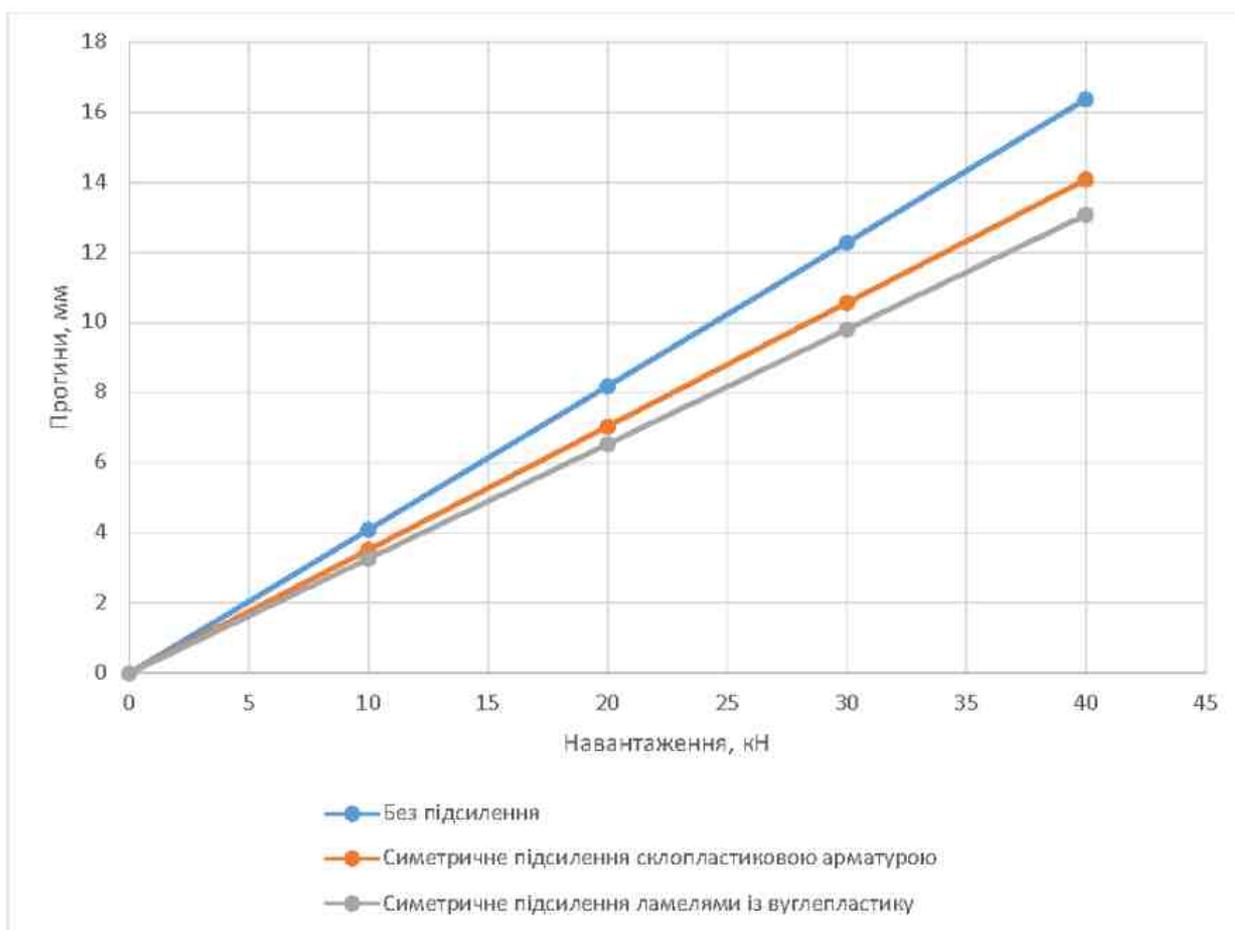


Рисунок 27 - Графік залежності прогинів від навантаження при розрахунку за методом скінчених елементів

РОЗДІЛ 4. ВИСНОВКИ

Проведено аналіз та встановлено фізико-механічні характеристики деревини і полімерних композитів, необхідні для завдання в розрахунковій моделі.

Чисельні дослідження посилених ДК підтвердили правильність прийнятих теоретичних передумов. В ході досліджень встановлено, що жорсткість дослідної балки, посиленою полімерними композитами, збільшувалася приблизно на 20%, а несуча здатність більш ніж на 35%.

ЖИТЕПАТҮПА

1. Hollaway, L., and Teng, J., *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2008.
2. CNR-DT 200/2004, *Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures*, National Research Council. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, 2004.
3. CNR-DT 201/2005, *Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Timber Structures*, National Research Council. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, 2007.
4. André, A., *Fibres for strengthening of timber structures*, Master Thesis, Luleå tekniska universitet, Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering, 2006.
5. Triantafillou, T., “Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood”, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No.8, 1998, pp. 1285-1295.
6. Radford, D. W., Van Goethem, D., Gutkowski, R.M., Peterson, M. L., “Composite repair of timber structures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 16, No. 7, 2002, pp. 417–425.
7. CEN TC 193/SC1/WG11, *Adhesives for on site assembling or restoration of timber structures. On site acceptance testing: Part 2: Verification of the shear strength of an adhesive joint*, Doc N21, CEN TC 193, 2007.
8. CEN TC 193/SC1/WG11, *Adhesives for on site assembling or restoration of timber structures. On site acceptance testing: Part 3: Verification of the adhesive bond strength using tensile proof loading*, Doc N22, CEN TC 193, 2007.

9. Broughton, J.G., Hutchinson, A.R., Review of relevant materials and their requirements for timber repair and restoration, LICONS CRAF_1999-71216, 2003.
10. Raftery G.M., Harte A.M., Rodd P.D., “Bond quality at the FRP–wood interface using wood laminating adhesives”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, No. 2, 2009, pp. 101–110.
11. Raftery, G.M., Harte, A.M., Rodd, P.D., “Bonding FRP materials to wood using thin epoxy glue lines”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, No. 5, 2009, pp. 580-588.
12. Davalos, J.F., Qiao, P.Z., Trimble, B.S., “Fiber-reinforced composite and wood bonded interfaces: Part1. Durability and shear strength”, *Journal of Composite Technology and Research*, Vol. 22, No. 4, 2000, pp. 224-231.
13. Harvey K., Ansell, M.P., “Improved timber connections using bonded-in GFRP rods”, In: *Proceedings of 6th World Conference on Timber Engineering*, Whistler, Canada, 2000.
14. Custodio, J., Broughton, J.G., “Factors influencing bond performance”, In *Core Document of COST Action E34, Bonding of timber*, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, 2008.
15. Pizzo, B., Smedley, D., “Adhesives for on-site bonding: characteristics, testing, applications”, In *State-of-the-art report on the Reinforcement of Timber Structures*, 2015, COST Action FP1101.
16. Smedley, D., Cruz, H., Paula, R., “Quality control on site”, In: *Core Document of COST Action E34, Bonding of timber*, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, 2008.
17. Wan J., Smith S., Qiao P., and Chen F., “Experimental Investigation on FRP-to-Timber Bonded Interfaces”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. A4013006:1-9.

- 18.Barbero E., Davalos J., and Munipalle U., “Bond strength of FRP-wood interface”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 13, No. 9, 1994, pp. 835-854.
- 19.Davalos J., Qiao P., and Trimble B., “Fiber-reinforced composite and wood bonded interfaces: Part 1. durability and shear strength”, *Journal of Composites Technology and Research*, Vol. 22, No. 4, 2000, pp. 224-231.
- 20.Lopez-Anido R., Gardner D., and Hensley J., “Adhesive bonding of eastern hemlock glulam panels with E-glass/vinyl ester reinforcement”, *Forest Products Journal*, Vol. 50, No. 11/12, 2000, pp. 43-47.
- 21.Crews K., and Smith S., “Tests on FRP-strengthened timber joints”, In: *Proceedings, Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2006, Miami, USA*, pp. 677-680.
- 22.Silva P., Cachim P., and Juvandes L., “Técnicas avançadas de reforço de estruturas de Madeira com compósitos reforçados com fibras (FRP)”, In: *Proceeding 1st Iberic Congress Cimad’04-Wood in Construction, Guimarães, 2004*, pp. 613-622.
- 23.Juvandes L., and Barbos R., “Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems”, *Strain*, Vol. 48, No. 2, 2012, pp. 124-135.
- 24.Wan J., Smith S., and Qiao P., “FRP-to-softwood joints: experimental investigation”, In: *Proceedings of Fifth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2010, Beijing, China*, pp. 951-954.
- 25.Lorenzis L., Scialpi V., and Tegola A., “Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber”, *Composites Part B: Engineering*, Vol.36, No. 4, 2005, pp. 279-289.
- 26.Valipour H. R., Crews K. Efficient finite element modelling of timber beams strengthened with bonded fibre reinforced polymers. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, no. 8.

P. 3291–3300.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.017>

27. Talreja, R., Singh, C.V, *Damage and Failure of Composite Materials*. Cambridge University Press, 2012.
28. Puck, A., “A Failure Criterion shows the Direction – Further Thoughts of the Design of Laminates”, *Kunststoffe German Plastics*, Vol. 82, 1992, pp. 29-32.
29. Schober, K.U., Rautenstrauch, K., “On the application of cohesive zone modeling in timber composite structures”, In: *Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2008)*, Miyazaki, Japan, 2008.
30. Schober, K.U., Rautenstrauch, K., “Structural Behaviour of Hybrid Timber-Composite Beams”, In: *Proceedings Composites & Polycon 2009*, American Composites Manufacturers Association, Tampa, FL, USA, 2009.
31. Martin ZA, Tingley DA., “Fire resistance of FRP reinforced glulam beams”, In: *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, Whistler, Canada, 2000.
32. Williamson T.G., “Fire performance of fiber reinforced polymer glued laminated timber”, In: *Proceedings of 9th World Conference on Timber Engineering*, Portland, Oregon, 2006.
33. Metten C.J., Page A.V., Robinson G.C., *Repair of structural timbers. Part 2 Fire resistant repairs*, TRADA, High Wycombe, UK, 1993.
34. Hallström S., Grenestedt, J. L., “Failure analysis of laminated timber beams reinforced with glass fibre composites”, *Wood Science and Technology*, Vol. 31, No. 1, 1997, pp. 17-34.
35. Hallström S., “Glass fibre reinforced Holes in Laminated timber”, *Wood Science and Technology*, Vol. 30, 1996, pp. 323-337.

36. Coureau J.L., Cuvillier E., Lavergne C., “Strength of locally PGF reinforced end-notched beams”, In: *Joints in Timber Structures*, Aicher S., Reinhardt H.W. (eds) International RILEM Symposium, 2001.
37. Jockwer, R., *Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches*, PhD Thesis, ETH Zurich, Institute of Structural Engineering, Zurich, 2014.
38. Enquist, B., Gustafsson, P. J., Larsen, H. J., “Glass-fibre reinforcement perpendicular to the grain”, In: *Proceeding of International Timber Engineering Conference*, London, 1991, pp. 3.242-3.250.
39. Nowak, T.P., Jasienko, J., Czepizak, D., “Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips”, *Construction and Building Materials* Vol. 40, 2013, pp. 197–206.
40. Kliger, R., Johansson, M., Crocetti, R., “Strengthening timber with CFRP or steel plates – short and long-term performance”, In: *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan, 2008.
41. Schober K.U., Rautenstrauch K., “Post-strengthening of timber structures with CFRPs”, *Materials and Structures*, Vol. 40, 2006, pp.27–35.
42. Borri, A., Corradi, M., Grazini, A., “A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, 2005, pp.143-153.
43. Li, Y.F., Xie, Y.M., Tsai, M.J., “Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp.411-422.
44. Johns K.C., Lacroix, S., “Composite reinforcement of timber in bending”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, 2000, pp. 899-906.

45. Gentile, C., Svecova, D., Rizkalla, S.H., "Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, No. 1, 2002, pp. 11-20.
46. Hernandez, R., Davalos, J.F., Sonti, S.S., Kim, Y., Moody, R.C., Strength and stiffness of reinforced yellow-poplar glued-laminated beams, Research Paper FPL-RP-554, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, US, 1997.
47. Raftery, G.M., Harte, A.M (2011): Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate, *Composites Part B: Engineering* 42(4):724-735.
48. Alam, P., Ansell, M.P. Smedley, D., "Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, No. 2, 2009, pp.95-106.
49. Pengyi, Z., Shijie, S., Chunmei, M., "Strengthening Mechanical Properties of Glulam with Basalt Fiber", *Advances in Natural Science*, Vol. 4, No. 2, pp. 130-133.
50. Akbiyik, A., Lamanna, A. J., Hale, W. M., "Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 5, 2007, pp. 991-1000.
51. Triantafillou, T., "Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, 1997, pp. 65-69.
52. Alam, P., Ansell, M. P., Smedley, D. "Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements", *Composites PartB: Engineering*, 40(2), pp. 95-106.
53. Burgers, T., Gutkowski, R., Balogh, J., and Radford, D., "Repair of Full-Scale Timber Bridge Chord Members by Shear Spiking," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, No. 4, 2008, pp. 310-318.

54. Gentry, T. R., "Performance of glued-laminated timbers with FRP shear and flexural reinforcement.", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 5, 2011, pp. 861-870.
55. Svecova, D., Eden, R.J., "Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars -an experimental investigation", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, 2004, pp. 45-55.
56. Lauber, B., "Ertüchtigung von Holztragwerken - Beispiele aus der Praxis", In: *Proceedings of the Holzbautag Biel*, Biel, 2008.
57. Sonti, S.S., Gangarao, H.V.S., "Strength and Stiffness Evaluations of Wood Laminates with Composite Wraps", In: *Proceedings of the 50th Annual Conference*, Composites Institute, The Society of Plastics Industry Inc., 1995.
58. Widmann, R., Jockwer, R., Frei, R., Haeni, R., "Comparison of different techniques for the strengthening of glulam members", In: *Enhance mechanical properties of timber, engineered wood products and timber structures: COST Action FP1004 Early Stage Researchers Conference*, Zagreb, Croatia, 2012, pp. 57-62.
59. Widmann, R., Tannert, T., Frei, R., "Comparison of different techniques for the shear strengthening of glulam members", In: *Proc. of Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2013)*, Empa, Istanbul, Turkey, 2013, 8 pp.
60. Triantafillou, T.C., Deskovic, N., "Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1270-1283.
61. Dagher, H., Gray, H., Davids, W., Silva-Hernandez, R., Nader, J., "Variable prestressing of FRP-reinforced glulam beams: methodology and behaviour", In: *Proceedings of World Conference on Timber Engineering (WCTE 2010)*, Riva del Garda, Italy, 2010.

- 62.Rodd, P.D., Pope, D.J., “Prestressing as a means of better utilising low quality wood in glued laminated beams”, In: Proceedings of the International Conference on Forest Products, Daejeon, Korea, 2003.
- 63.Negrão, J., Brunner, M., Lehmann, M., “Pre-stressing of timber”, In: COST E34 - Bonding of Wood - WG1: Bonding on site - Core Document, K. Richter and H. Cruz eds., 2008.
- 64.Brunner, M., Schnueriger, M., “FRP-prestressed timber”, In: Proceedings of 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Greece, 2007
- 65.Brady, J.F., Harte, A.M., “Flexural reinforcement of glue-laminated timber beams using prestressed FRP plates”, In: Proceedings of 4th International Conference on Advanced Composites in Construction (ACIC), Edinburgh, UK, 2008.
- 66.McConnell, E., McPolin, D., Taylor, S., “Post-tensioning of glulam timber with BFRP tendons”, Proceedings of ICE- Construction Materials, 2014, p. 1-9.
- 67.Buchanan, A., “Bending strength of lumber”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 5, 1990, pp. 1213-1229.
- 68.Raftery, G.M., Harte A.M., “Nonlinear numerical modeling of FRP reinforced glued laminated timber”, Composites: Part B, Vol. 52, 2013, pp. 40-50.
- 69.Dietsch, P., “Einsatz und Berechnung von Schubverstärkungen für Brettschichtholzbau-teile”, PhD Thesis, Technical University of Munich, Munich, 2012.
- 70.Armstrong, L.D., Kingston R.S.T., “Effect of moisture changes on creep in wood”, Nature, Vol. 185, 1960, pp.862-863.
- 71.Hearmon R.F.S., Paton J.M., “Moisture content changes and creep of wood”, Forest Products Journal, Vol. 14, 1964, pp. 357-359.

72. Lou, Y., Schapery, R.A., "Viscoelastic characterization of a nonlinear fiber-reinforced plastic", *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, No. 2, 1971, pp. 208-234.
73. Miravalles, M., Dharmawan, I., *The creep behaviour of adhesives. A numerical and experimental investigation.* Chalmers Uni. of Technology. Master's thesis, 2007.
74. Hansson, S., Karlsson, K., *Moisture-related creep of reinforced timber. Theoretical studies and laboratory tests,* Chalmers Uni. of Technology. Master's thesis, 2007.
75. Perstorper, M., Pellicane, P.J., Kliger, I.R., Johansson, G., "Quality of timber products from Norway spruce", *Wood Science and Technology*, Vol. 29, 1995, pp. 157-170.
76. Anon., *Low intrusion conservation systems for timber structures (LICONS),* <http://www.licons.org/>, 2006.
77. Greco, A., Maffezzoli, A., Casciaro, G., Caretto, F., "Mechanical properties of basalt fibers and their adhesion to polypropylene matrices", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 67, 2014, pp. 233-238.
78. CEN TC 193/SC1/WG11, *Adhesives for on site assembling or restoration of timber structures. On site acceptance testing: Part 3: Verification of the adhesive bond strength using tensile proof loading,* Doc N22, CEN TC 193, 2007.
79. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К.:Мінбуд України, 2006 – 11 с
80. Дерев'яні конструкції. Основні положення. ДБН В.2.6-161:2017. – [Чинний від 2018-02-01]. – К.:Мінрегіон України, 2017 – 111 с.