

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ГОМОН ПЕТРО СВЯТОСЛАВОВИЧ**



УДК 624. 011:620.172/.178.2

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ  
ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЦІЛЬНОЇ ТА КЛЕСНОЇ ДЕРЕВИНИ З  
КОМБІНОВАНИМ АРМУВАННЯМ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Київ – 2026**

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Київському національному університеті будівництва і архітектури (КНУБА м. Київ) Міністерства освіти і науки України та Національному університеті водного господарства та природокористування (НУВГП м. Рівне) Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**МИХАЙЛОВСЬКИЙ ДЕНИС ВІТАЛІЙОВИЧ,**  
Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри металевих і дерев'яних конструкцій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**БАРАБАШ МАРІЯ СЕРГІЇВНА,**  
Національного університету «Київський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва;

доктор технічних наук, професор  
**ДЕМЧИНА БОГДАН ГРИГОРОВИЧ,**  
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри будівельних конструкцій і мостів;

доктор технічних наук, професор  
**ШЕХОРКІНА СВІТЛАНА ЄВГЕНІВНА,**  
Український державний університет науки і технологій Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій

Захист відбудеться «14» травня 2026 р. о 13-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, ауд. 319.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31 або за посиланням: <https://www.knuba.edu.ua/speczializovana-vchena-rada-d-26-056-04/>

Реферат розісланий «9» квітня 2026 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.056.04  
д.ф., доцент



Герман Затилюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Наша планета має великі запаси лісових ресурсів. А саме, 27% площі суші планети покриті лісами. Переважна більшість лісів розташована у двох поясах: північному 15% (з перевагою хвойних порід) та тропічному 55% (з переважаючою кількістю листяних порід). Об'єм заготівлі та використання деревини в світі досягає 8 млрд. м<sup>3</sup> і перевищує об'єми використання таких матеріалів, як сталь і цемент. Універсальність використання деревини забезпечує використання її в різних сферах промисловості: деревообробній, меблевій, будівельній та легкій. Завдяки широкому розповсюдженню в природі, легкості видобування та обробки, біологічній стійкості, екологічності, а також естетичним властивостям, попит на неї не зменшується і суттєво зростає в розвинених країнах.

Найбільшу частину дерев'яних будівельних матеріалів, які використовуються у будівництві в Україні становлять дерев'яні бруси, обрізні та не обрізні дошки, фанері листи, деревостружкові і деревоволокнисті плити. З усіх цих матеріалів широкого використання, як будівельних конструкцій, набули дерев'яні бруси з суцільної та клеєної деревини. Їх використовують, як елементи кроквяних та несучих конструкцій, в яких найкраще реалізуються такі природні властивості, як роботу її на стиск та стиск зі згином.

Конструкції з деревини мають велику кількість переваг, а саме: високу міцність за малої ваги, легкий спосіб виготовлення конструкцій, відновлювання матеріалів, екологічність і високі естетичні характеристики. Проте є і суттєві недоліки. До таких недоліків можна віднести легке пошкодження конструкцій природними шкідниками, слабка вогнестійкість, відносно низький модуль пружності, а також анізотропія фізико-механічних властивостей. Якщо недоліки з природними шкідниками та вогнестійкістю долаються просочуванням деревини антисептиками й антипіренами, то досить низьке значення модуля пружності елементів та боротьба з анізотропією фізико-механічних властивостей деревини є актуальною проблемою. Саме вирішенню цих двох проблем і присвячена дана наукова робота: збільшення жорсткості дерев'яних конструкцій та зменшення впливу анізотропії деревини шляхом армування деревини іншими матеріалами. В дисертації враховуються основні принципи конструювання, а саме забезпечення їх міцності, жорсткості, надійності та економічності. Тому для забезпечення безвідмовної роботи конструкцій виконуються розрахунки конструктивних елементів на різні види зовнішніх впливів, забезпечення достатньої жорсткості конструкцій з відповідним аналізом прогинів, зсувів волокон, переміщень частин елементів з деревини. Всі ці чинники обумовлюють створення комплексного підходу до загальної методики моделювання та розрахунку дерев'яних елементів, що працюють на згин, з комбінованим армуванням і в подальшому забезпечить достатню точність визначення несучої здатності конструкцій, економічно-ефективне використання запроєктованих конструкцій, економію матеріалів та ресурсів, створення нових композитних конструкцій, що в наш час є особливо актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконана робота є одним із етапів досліджень, які виконуються на кафедрі промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного

господарства та природокористування в межах науково-дослідних робіт: «Дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, удосконалення методики їх розрахунку та розробка пропозицій до нормативних документів» (номер державної реєстрації 0117U002816), «Дослідження роботи та удосконалення методів розрахунків будівельних конструкцій при різних режимах зовнішніх впливів» (номер державної реєстрації 0107U004181) та за темою «Розробити нові та удосконалити існуючі методики розрахунку будівельних конструкцій, включаючи підсилені, при дії одноразових та повторних навантажень» (державний реєстраційний номер 0112U001122).

**Мета роботи:** створити методологічні засади оцінки несучої здатності та напружено-деформованого стану елементів з цільної та клеєної деревини з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням, встановити можливі характерні стадії роботи таких елементів від початку навантаження до руйнування, сформулювати критерії досягнення елементами граничних станів та на їх основі розробити методику їх моделювання і розрахунку.

**Завдання дослідження.** Для досягнення мети в роботі поставлені такі задачі:

- розвинути теоретичні основи роботи та конструювання елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином;
- розробити методологічні засади для моделювання та розрахунку елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з різними варіантами армування;
- запропонувати комплекс методик для моделювання та розрахунку елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з комбінованим армуванням під час їх попереднього напруження та роботи;
- розробити науково-прикладний підхід до розрахунку та рекомендації щодо конструювання елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням за дії одноразових навантажень;
- з використанням моделювання запропонувати технологічні рішення попереднього напруження армованих балок з цільної та клеєної деревини та описати основні етапи попереднього напруження;
- удосконалити методику та провести комплексні експериментальні дослідження роботи елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням за дії одноразових навантажень;
- обґрунтувати та запропонувати апроксимуючі функції експериментальних діаграм деформування деревини, сталюї та композитної арматури, які б, досить точно, враховували вплив різних факторів при їх сумісній роботі;
- провести експериментальні дослідження з виконанням попереднього напруження комбіновано армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та виконати експериментальні дослідження їх роботи з встановленням напружено-деформованого стану;
- встановити вплив пасивного та попередньо напруженого комбінованого армування на роботу армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин;

– розробити спосіб верифікації та провести верифікацію запропонованих методик моделювання роботи армованих конструкцій з цільної та клеєної деревини на основі статистичного порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними;

– розробити методіку розрахунку армованих різними матеріалами елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, стиск зі згином та розтяг зі згином із застосуванням методу скінчених елементів в програмному комплексі ЛПРА САПР.

**Об’єкт досліджень** – робота та проектування конструкцій з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином, із використанням пасивного та попереднього напруженого комбінованого армування.

**Предметом дослідження** – напружено-деформований стан, жорсткість, надійність, економічність пасивно та попередньо напружених армованих конструкцій з цільної та клеєної деревини.

**Методи дослідження:** огляд та аналіз експериментальних та теоретичних досліджень на основі існуючих літературних джерел; математичне моделювання роботи армованих попередньо напружених елементів з цільної та клеєної деревини; експериментальні дослідження роботи армованих попередньо напружених елементів з цільної та клеєної деревини в лабораторних умовах, а також обробка та аналіз отриманих експериментальних результатів; проведення верифікації експериментальних та теоретичних даних композиційних конструкцій з деревини; загальні методи емпіричного та теоретичного дослідження – спостереження, порівняння, вимірювання, експеримент, абстрагування, аналіз, синтез, дедукція, індукція та моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Новизна одержаних результатів полягає в наступному:

*вперше:*

-розроблено методологічні засади для моделювання та розрахунку елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з різними варіантами армування, використовуючи сучасні знання про міцнісні та деформативні властивості армуючих матеріалів та їх сумісну роботу з деревиною, що дає можливість прогнозувати роботу даних елементів на різних ступенях завантаження, визначати несучу здатність даних конструкцій та вдосконалити їх конструювання;

-запропоновано комплекс методик для моделювання та розрахунку елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з комбінованим армуванням із врахуванням попереднього напруження матеріалів, що дає можливість прогнозувати процес попереднього напруження та роботу даних елементів на різних етапах, визначити несучу здатність даних конструкцій та надати рекомендації по їх конструюванню;

-запропоновані нові технологічні рішення попереднього напруження комбіновано армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином після виконання моделювання їх роботи, встановлення етапів попереднього напруження та аналізу отриманих теоретичних результатів, що дозволило створити процес попереднього напруження елементів з цільної та клеєної

деревини, що працюють на згин та стиск зі згином та розширити сферу їх застосування;

-отримані нові експериментальні результати деформування деревини та сталльної арматури, які використовуються в конструюванні армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин на основі експериментальних досліджень та апроксимуючих методик, що дає можливість їх врахування в теоретичних дослідженнях у вигляді апроксимуючих функцій;

-при моделюванні дерев'яних елементів з цільної та клеєної деревини отримані нові закономірності розвитку та розподілу дотичних (сколюючих) напружень, що дозволяє врахувати їх при проектуванні;

-отримані нові експериментальні результати випробування елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, з використанням пасивного та попередньо напруженого комбінованого армування, що дозволило встановити вплив попереднього напруження, вдосконалити їх конструювання, збільшити їх економічність та розширити сферу їх застосування;

-виконано попереднє напруження елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з комбінованим армуванням та досліджено їх роботу шляхом використання нових методик попереднього напруження та запропонованих удосконалених експериментальних методик випробування, що дало можливість поглибити знання про процес деформування, зміну напружено-деформованого стану в таких елементах та провести верифікацію запропонованих методик.

*удосконалено:*

-методичні підходи для визначення напружено-деформованого стану нормальних перерізів елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином, дотичних напружень та прогинів завдяки використанню запропонованих апроксимованих функцій деформування деревини та функцій «момент-кривина», що дозволяє прогнозувати роботу елементів, що працюють на згин та стиск зі згином, на різних ступенях їх завантаження.

-науково-прикладний підхід до розрахунку граничних станів за першою та другою групою елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням шляхом використання комплексу методик, що дало можливість використати даний підхід для рішення інженерних задач при конструюванні та розрахунку елементів, що працюють на згин та стиск зі згином;

-експериментальну методику випробування попередньо напружених елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з комбінованим армуванням, яка враховує особливості армування, етапи попереднього напруження та роботи, що дає змогу зрозуміти і детальніше описати роботу елемента, що працює на згин та провести верифікацію методологічних засад;

-спосіб верифікації методик моделювання роботи армованих конструкцій з цільної та клеєної деревини, шляхом використання діаграм «момент-кривина», які побудовані на основі експериментальних та теоретичних досліджень, що дозволило верифікувати теоретичні дані не тільки при граничних станах, а й під час виготовлення та роботи елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином.

*Набули подальшого розвитку* теоретичні основи, моделювання роботи, розрахунки та конструювання елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином, шляхом комплексного врахування міцнісних та деформативних властивостей деревини, сталі, композиційних армуючих матеріалів та їх сумісної роботи, що дозволяє покращити методики прогнозування роботи елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином, збільшити їх несучу здатність, жорсткість та дозволяє розширити сферу їх застосування.

**Достовірність основних положень та здобутих результатів забезпечується:**

- результатами експериментальних досліджень, які виконані на сучасному науково-технічному рівні та з дублюванням даних із використанням повірених вимірювальних приладів й апаратури з високим класом точності;
- використанням апарату математичної статистики для обробки експериментальних даних та отримання аналітичних залежностей;
- задовільною збіжністю отриманих експериментальних даних з теоретичними результатами та з результатами інших авторів;
- використанням широко апробованих положень теорії міцності твердого тіла.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені методологічні засади для моделювання та розрахунку комбіновано армованих елементів із цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином дозволяє вдосконалити сучасні норми проектування дерев'яних конструкцій. Запропонований комплекс методик моделювання можна використати, як сучасний інструмент для визначення напружено-деформованого стану дерев'яних комбіновано армованих елементів, тим самим вдосконаливши методику їх розрахунку та проектування. Запропоновані технологічні рішення армування балок із цільної та клеєної деревини з виконанням попереднього напруження дозволяють зменшувати прогини елементів, що працюють на згин та стиск зі згином, розширюючи сферу їх застосування. Отримані числові результати експериментальних досліджень, мають практичну цінність у верифікації сучасних методик.

**Особистий внесок здобувача.** Всі експериментально-теоретичні дослідження, ідеї, а також результати викладені в дисертації автор отримав самостійно. Одноосібно автором були опубліковані статті та тези [1; 4; 5; 6; 10–18; 38; 39; 41; 42; 44; 45; 48]. Конкретний внесок автора дисертації в кожен наукову працю, опубліковану зі співавторами, наведено на С. 35–40.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи викладені на наступних конференціях та форумах: 1) “Conference proceedings of the Scientific Session on Applied Mechanics X” (Bydgoszcz, Poland, 23 November 2018); 2) 28th conference “Surveying, Civil Engineering, Geoinformation In Sustainable Development”. 2–10 June, 2020. Bydgoszcz, Poland; 3) 2nd International scientific and practical conference — Topical issues of modern science, society and education. September 5–7, 2021. SPC Sci-conf.com.ua, Kharkiv, Ukraine; 4) 6th WMCAUS. World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture. Urban Planning Symposium. 31 August – 3 September, 2021. Prague (Czech Republic); 5) 10 міжнародній науково-практичній конференції «Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». 19–21 жовтня, 2021 р., м. Рівне (НУВГП); 6) 1st Virtual International

Conference “In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction”. October 11–13, 2021. Ternopil, Ukraine; 7) VII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів. Інновації у будівництві. 12 травня 2022 р., м. Луцьк (ЛНТУ); 8) V міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектурі села», 16–17 червня 2022 року, м. Дубляни; 9) 7th WMCAUS. World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning – Symposium, Prague (Czech Republic), 5–9 September, 2022; 10) XXIII міжнародному науково-практичному форуму «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій», 4–6 жовтня 2022 року, м. Дубляни; 11) VII Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи», 21–22 жовтня 2022 р., м. Луцьк (ЛНТУ); 12) 2nd International Symposium on Risk Analysis and Safety of Complex Structures and Components (IRAS 2023), April 2–4, 2023, Belgrade, Serbia; 13) Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини», 9–10 червня 2023 року, м. Одеса (ОДАБА); 14) VII International Conference “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction (DMDP 2023), October 18–20, 2023. Ternopil, Ukraine; 15) 12th International Scientific Session Applied Mechanics November 15, 2024, Virtual-Online, Bydgoszcz, Poland, 2024); 16) 12th Annual Conference of Society for Structural Integrity and Life (DIVK12) November 17–19, 2024 Belgrade, Serbia; 17) X Міжнародній науково-практичній інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених, 15 травня 2025 р., м. Луцьк (ЛНТУ); 18) Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини», 12–14 червня 2025 року, м. Одеса (ОДАБА); 19) VIII International Conference “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction”. October 15–17, 2025. Ternopil.

Дисертаційна робота доповідалася та обговорювалася: на засіданні міжкафедрального спеціалізованого наукового семінару «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» Одеської державної академії будівництва та архітектури (Протокол № 2 від 14.06.2024 р.).

**Публікації.** Основний зміст викладено в 51 наукових працях, серед яких 10 статей у наукових періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science; 26 статей у фахових виданнях категорії «Б», 1 патент на корисну модель; 1 стаття в інших виданнях; 13 публікацій, що засвідчують апробацію наукової роботи.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (261 найменувань), додатків. Дисертаційна робота викладена на 419 сторінках (загальний обсяг). Серед них – 305 сторінок основного тексту, 19 сторінок таблиць та рисунків (30 таблиць, 195 рисунків), 26 сторінок списку використаних джерел.

**Подяка.** Висловлюю глибоку подяку науковому консультанту – доктору технічних наук, професору кафедри металевих та дерев’яних конструкцій КНУБА Михайловському Денису Віталійовичу. Також завдячую доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП Бабичу Євгену Михайловичу за цінні поради та сприянні в проведенні експериментальних досліджень.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та поставлені задачі для її досягнення, сформульовано наукову новизну роботи та визначено її практичну цінність.

У першому розділі дисертації проведено огляд та детально проаналізовано сучасний стан експериментально-теоретичних досліджень роботи елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, армованих сталевую та композитною арматурою. На основі проведеного аналізу визначено напрямки наукових досліджень дисертації та шляхи вирішення поставлених задач.

Вивченням деревини, як конструкційного матеріалу, займалися багато вчених в усьому світі ще з XIX століття. Так, Andre A. використав деревину для виготовлення клеєного дерев'яного бруса. Завдяки склеюванню деревини було підвищено жорсткість і міцність конструкцій, шляхом покращення однорідності матеріалу, а відповідно і фізико-механічних властивостей. Клеєна деревина водночас дала змогу збільшити прольоти будівельних конструкцій, а також відкрила можливість розширити діапазон розмірів поперчних перерізів та геометричних форм. Дослідженню роботи клеєної деревини були присвячені роботи: Alan A., Donadon B.F., Kandler G., Balduzzi G., Balduzzi G., Olsson A., Vlab H.J., Glos P., Serrano E., Soriano J., Usman A., De Luca V., Михайловського Д.В., Комара М.А., Демчини Б.Г., Сурмая М.І., Шехоркіної С.Є. та інших.

Водночас вивченням фізико-механічних властивостей деревини займалися такі вчені як Белянкін Ф.П., Torres R. J., Vlab H.J., Glos P., Луцьковський В.М., Поберейко Б.П., Флуд Л.О., Клименко В.З., Гомон С.С., Фурсов В.В., Михайловський Д.В., Гомон Св.Св. Всі автори відзначають значну анізотропію фізико-механічних властивостей деревини. Внаслідок анізотропії фізико-механічних властивостей при дії зовнішніх навантажень механічні властивості за розтягу, стиску, згину та зсуву проявляються по-різному і це необхідно враховувати під час розрахунку і проектування будівельних конструкцій з цільної та клеєної деревини, бо міцність вздовж волокон деревини за розтягу, стиску та зрізу значно більші за міцність поперек волокон. Цією умовою сама природа диктує використання деревини в несучих конструкціях, які працюють на згин, стиск, стиск зі згином та розтяг.

Автори Soriano J., Usman A., Демчина Б.Г., Комар М.А., Михайловський Д.В., Щуко В.Ю., Рощина С.І. виходячи з аналітичних результатів, відзначають здатність деревини до збільшення спротиву вигину, шляхом введення підсилення в розтягнуту зону елемента. Внаслідок чого більшість дослідників вказують на збільшення несучої здатності та жорсткості елементів з деревини, що працюють на згин. Автори, які займались дослідженням балок підсилених неметалевою арматурою, такі як P. Alam, O. Garzon, B. F. Donadon, Б.Г. Демчина, М.І Сурмай, G. M. Raftery, J. Brol, P. D. Rodd, Комар М.А., Михайловський Д.В. відмічали збільшення жорсткості та міцності конструкцій. Також аналіз досліджень підтверджує, що використання більш жорстких армуючих елементів з вуглецевим волокном (CFRP) показують краще результати за скловолокно (GFRP) та базальтові волокна (BFRP). Так в роботах Т.С. Triantafillou, N. Deskovic, H. Yang, Borri E. наведені дослідження попередньо

напруженої деревини шляхом натягу вуглецевих стрічок. Всі сучасні запропоновані способи попереднього натягу металевої та неметалевої арматури мають складний процес, пов'язаний з необхідністю спеціального обладнання або технологічною складністю.

Необхідно зауважити, що в нормативній літературі України ДБН В.2.6-161, ДСТУ-Н Б В.2.6-184 та країнах Євросоюзу використання елементів з цільної чи клеєної деревини з повздовжнім армуванням не передбачається. Проте, сучасні автори, в основі розрахунку армованих дерев'яних конструкцій використовують умовно прийнятну пружну стадію роботи. При цьому вважається, що сумісна робота між арматурою та деревиною є постійною і безперервною по всій довжині конструкції на весь період експлуатації. Визначення несучої здатності за нормальними напруженнями армованих конструкцій з цільної чи клеєної деревини на поперечний згин за короткочасної дії навантажень зводиться до використання в розрахунках приведених геометричних поперечних перерізів елемента із застосуванням безрозмірного коефіцієнта  $n$  у вигляді відношення модулів пружності арматури і деревини.

На основі огляду сучасних досліджень було сформовано мету роботи та поставлені задачі дослідження.

У другому розділі проведено обґрунтування запропонованих робочих гіпотез та передумов моделювання несучої здатності нормального перерізу, прогнозування граничної несучої здатності, жорсткості армованих та неармованих елементів, що працюють на згин з цільної та клеєної деревини. В розділі розглянуто механізм деформування деревини в поперечному перерізі та сумісність роботи різних матеріалів від початку прикладення навантажень до руйнування. Для аналізу деформування було побудовано суміщену діаграму деформування різних матеріалів, що можуть використовуватись в згинальному елементі (рис. 1).

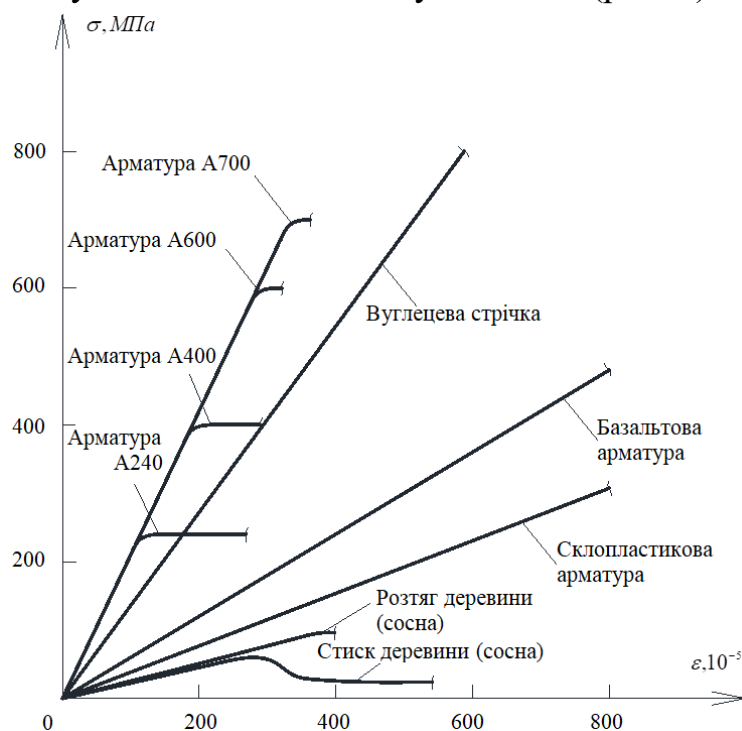


Рис. 1. Суміщені оптимізовані діаграми деформування різних матеріалів, що використовуються в згинальному елементі

Розроблено метод визначення напружено-деформованого стану перерізів елементів з деревини при згині на основі встановлення внутрішніх зусиль елемента від кривини, тобто за діаграмою «момент-кривина». Визначення напружено-деформованого стану проводилось з використанням двох функцій, які описують напружено-деформований стан деревини на стиск рівнянням (1) та розтяг – (2). Використання цих функцій дозволяє врахувати реологічні, а також пружно-пластичні характеристики деревини:

$$\sigma_{w,c} = f_{w,c}(u_{w,c}); \quad (1)$$

$$\sigma_{w,t} = f_{w,t}(u_{w,t}). \quad (2)$$

Шляхом використання алгоритму для визначення графіку «момент-кривина» побудовано залежність згинального моменту від кривини, в якому знаходиться поперечний переріз (рис. 2). Наведені рівняння для визначення прогинів, а також дотичних зусиль з урахуванням пружно-пластичних характеристик деревини.

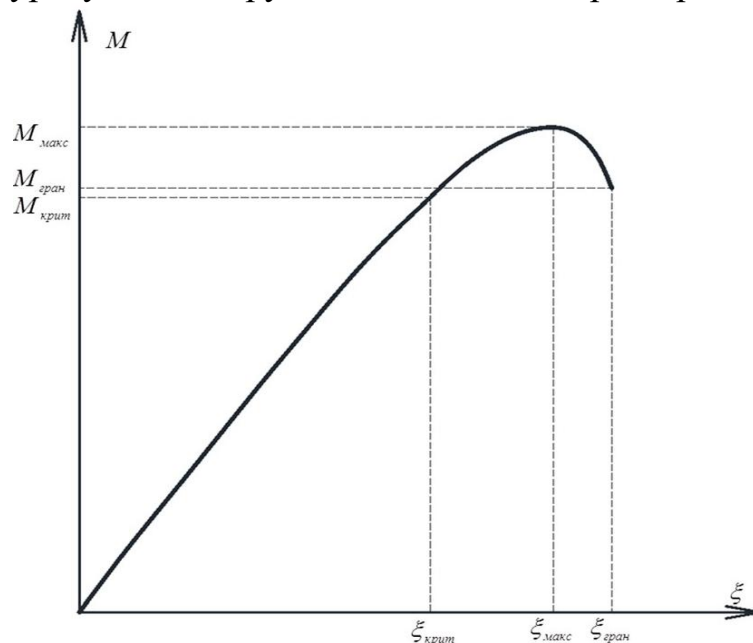


Рис. 2. Загальний вигляд графіку залежності «момент-кривина» для дерев'яного згинального елемента прямокутного поперечного перерізу

Виходячи з попередніх встановлених передумов та побудованої діаграми «момент-кривина», можна визначити максимальне значення завантаження, яке може сприйняти поперечний переріз згинального елемента та його граничний прогин. Для певного однакового максимального моменту можна встановити мінімальні розміри поперечного перерізу балок та їх довжини для одночасного досягнення за двома групами граничного стану, побудувавши діаграму залежності ширини перерізу та довжини балки до висоти перерізу (рис. 3). Перша діаграма виконана для згинального елемента на двох опорах з прикладеним рівномірно розподіленим навантаженням, а друга - для зусилля з зосередженим прикладеним навантаженням. Криволінійна лінія графіку розділяє балки на дві зони по досягненню граничного стану елемента.

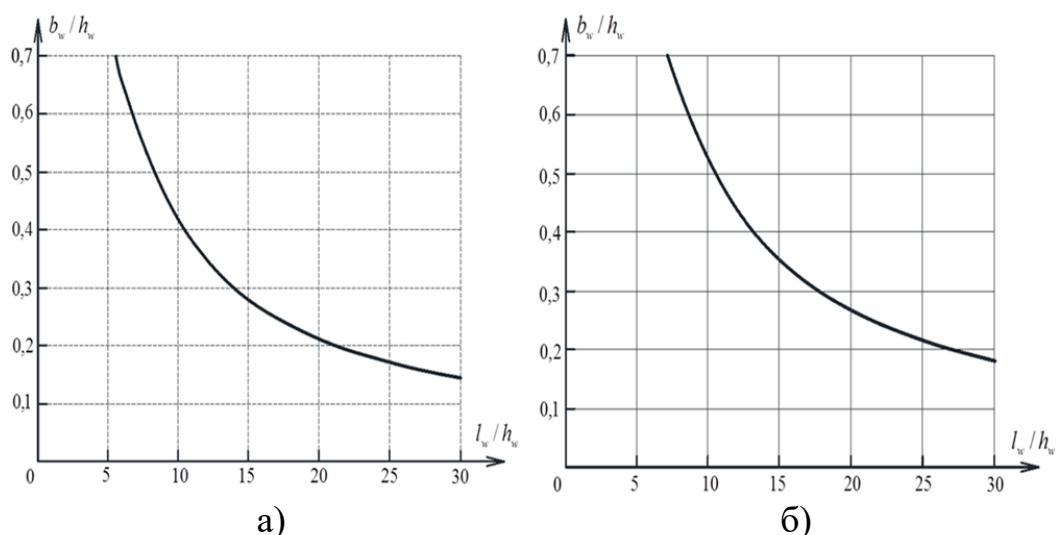


Рис. 3. Графік залежності співвідношення геометричних розмірів при співпадінні двох граничних станів (граничного прогину та руйнування):  
а) для консольної балки б) для балки на двох опорах

Враховуючи те, що дерев'яні (неклеєні) елементи проектується з висотою перерізу  $b_w/h_w = 0,4...0,6$  та довжиною  $l_w/h_w = 15...20$ , то в таких елементах граничний стан експлуатаційної придатності настає раніше.

Описані передумови та побудовано епюри максимальних дотичних напружень з урахуванням пружно-пластичної роботи. Епюри нормальних напружень та деформації в поперечних перерізах 1 та 2 від дії моментів  $M_1$  та  $M_2$ , які розглянуто для визначення дотичних напружень наведено на рис. 4.

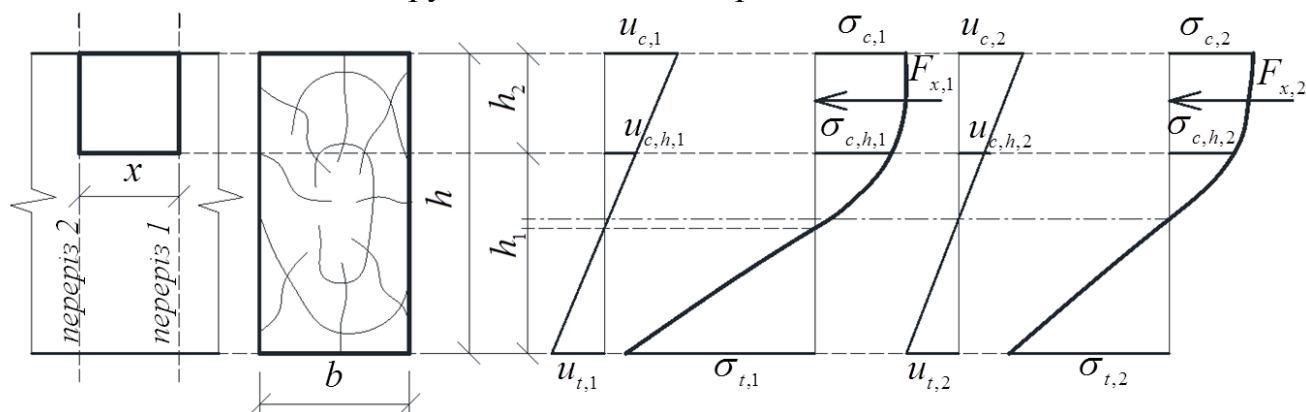


Рис. 4. Епюри нормальних напружень та деформації в поперечних перерізах 1 та 2 від дії моментів  $M_1$  та  $M_2$

З урахуванням рівняння (3) визначення дотичних (сколюючих) напружень зводиться до визначення двох сил, що діють в двох зрізаючих перерізах  $F_{x,1}$  та  $F_{x,2}$ :

$$\tau_x = bx(F_{x,1} - F_{x,2}); \quad (3)$$

$$F_{x,1} = by_{c,1} \left( \sum_{k=1}^4 \frac{w_k}{k+1} \cdot \frac{u_{c,1}^k}{u_{c,0,d}^{k-1}} \right) - by_{c,h,1} \left( \sum_{k=1}^4 \frac{w_k}{k+1} \cdot \frac{u_{c,h,1}^k}{u_{c,0,d}^{k-1}} \right); \quad (4)$$

$$F_{x,2} = by_{c,2} \left( \sum_{k=1}^4 \frac{w_k}{k+1} \cdot \frac{u_{c,2}^k}{u_{c,0,d}^{k-1}} \right) - by_{c,h,2} \left( \sum_{k=1}^4 \frac{w_k}{k+1} \cdot \frac{u_{c,h,2}^k}{u_{c,0,d}^{k-1}} \right). \quad (5)$$

Описані методики для прогнозування роботи пасивно армованих елементів з деревини, що працюють на згин підсиленних металевими матеріалами (гарячекатана арматура, металева стрічка). Для описання фізико-механічних характеристик металу було використано функції їх роботи на стиск та розтяг відповідно (6) та (7):

$$\sigma_{s,c} = f_{s,c}(u_{s,c}); \quad (6)$$

$$\sigma_{s,t} = f_{s,t}(u_{s,t}). \quad (7)$$

Описано стадії напружено-деформованого стану підсиленого металевими матеріалами елемента з деревини, а також наведено алгоритм для визначення графіку «момент-кривина» (рис. 5). В загальному можна зробити висновки, що встановлення арматури в елемент конструкції з деревини дозволяє збільшити міцність і жорсткість. Найкраще підвищення несучої здатності елемента настає при одночасному підсиленні стиснутої та розтягнутої зон елемента з деревини, що працює на згин. Також можливе застосування армування стиснутої зони для збільшення несучої здатності елементів з деревини, що працюють на згин. Підсилення розтягнутої зони слід застосовувати у випадках, якщо необхідно підвищити надійність цієї зони або підсилити елемент, який має дефекти в розтягнутій зоні.

Описано методику визначення дотичних (сколюючих) напружень для армованої балки з урахуванням пружно-пластичних характеристик деревини. Проведений порівняльний аналіз впливу на максимальні дотичні напруження, що виникають в досліджуваних балках. Встановлено, що армування балки впливає на виникнення дотичних напружень за рахунок створення додаткової пари сил. По відношенню до неармованої балки досягнення граничних значень дотичних напружень настає раніше. Це обумовлює можливість руйнування армованих балок за дотичними напруженням.

Приведено методику урахування напружень зрізу вздовж волокон в армованих та неармованих балках, а також урахування дотичних (сколюючих) напружень при розрахунку прогинів. Врахування додаткових прогинів викликаних сколюючими напруженнями можна здійснити шляхом обчислення додаткової кривини, яку викликають дані напруження, загальну кривину на елементарній ділянці слід визначати за формулою (8):

$$d\alpha = \xi_u(l)dl + \xi_\gamma(l)dl. \quad (8)$$

Тоді, як кут повороту для елементарної ділянки може бути визначений за формулою (9):

$$\xi_{\gamma,i} = \frac{\sum_o^k \Delta w_i}{\left( \Delta x + \sum_o^k \Delta w_i \right) h}. \quad (9)$$

У третьому розділі встановлено стадії напружено-деформованого стану пасивно підсиленого елемента з деревини, що працює на згин комбінованим армуванням (рис. 6), виконано алгоритм побудови графіку «момент-кривина» для

підсиленого елемента (рис. 7). При цьому для описання роботи вуглецевої стрічки було прийнято функцію (10):

$$\sigma_{cs,t} = f_{cs,t}(u_{cs,t}). \quad (10)$$

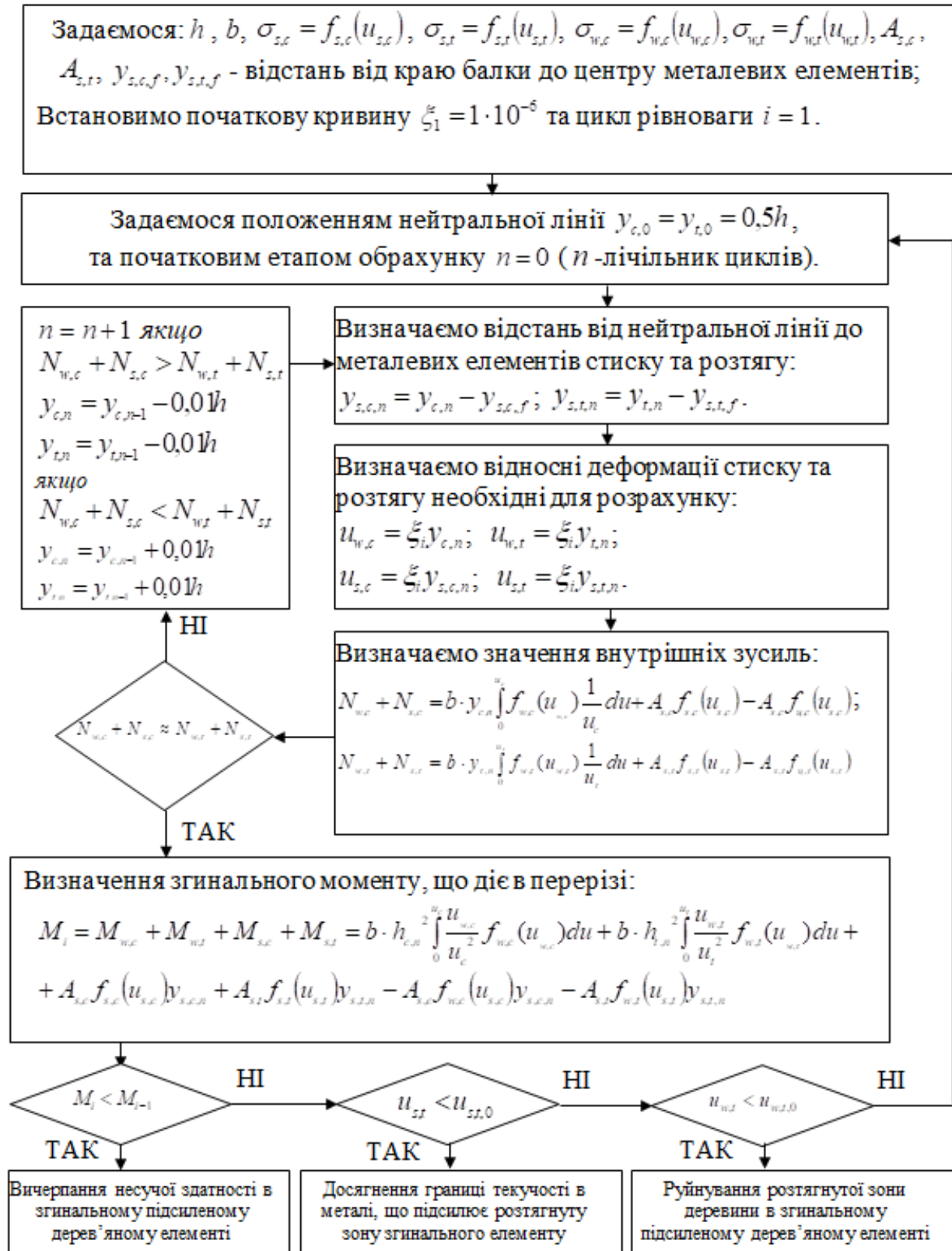


Рис. 5. Алгоритм побудови графіку «момент-кривина» для підсиленого металевими стержнями елемента з деревини

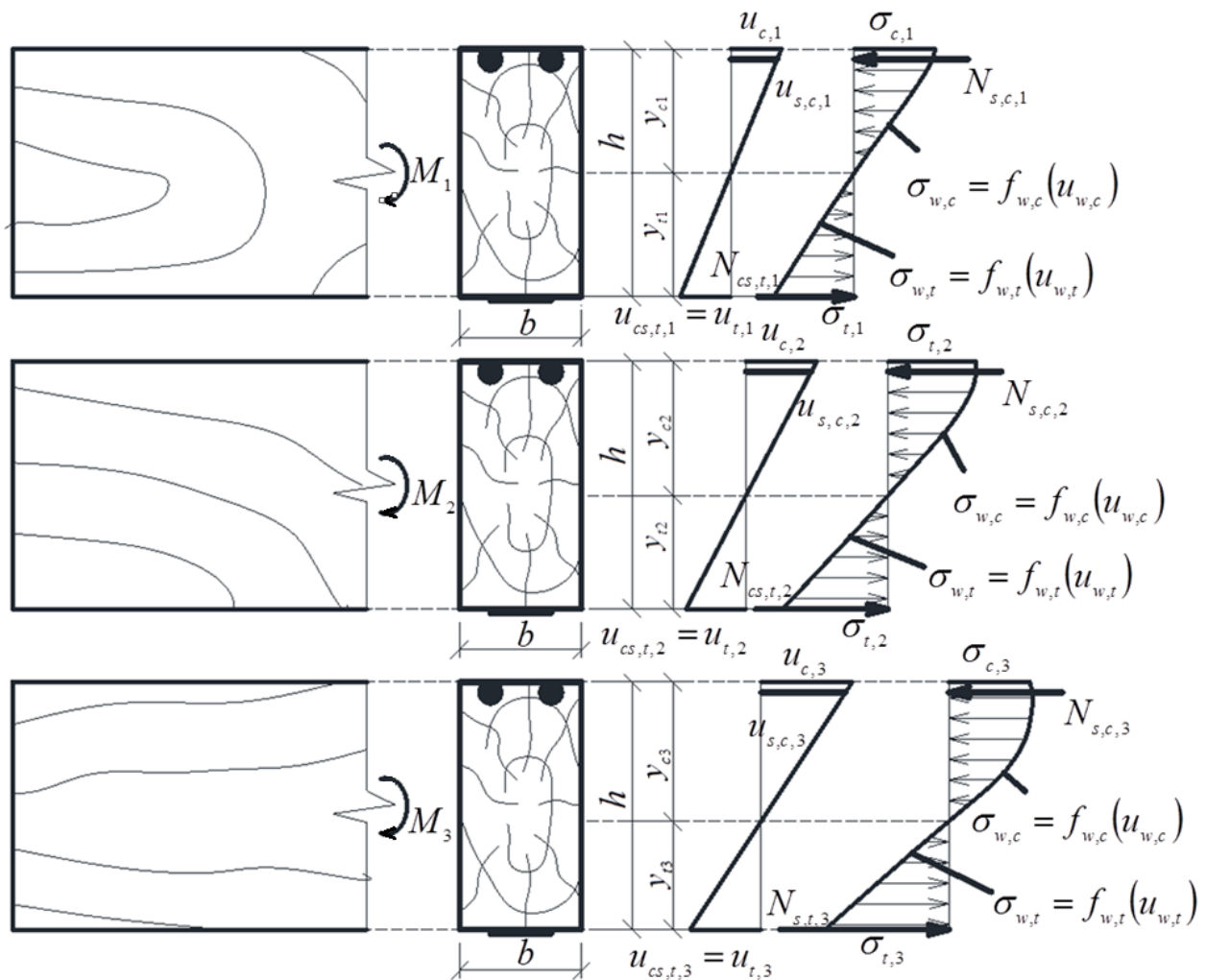


Рис. 6. Стадії напружено-деформованого стану підсиленого металевими та композитними матеріалами елементу з дерева, що працює на згин

Отримавши залежність у вигляді діаграми «згинальний момент – кривина», повністю була вирішена проблема з визначення прогину підсиленого елементу, що працює на згин.

Проведено моделювання пасивно армованих згинальних дерев'яних елементів, встановлено вплив підсилення на несучу здатність елемента з дерева, що працює на згин за рахунок армування, для типової балки  $10 \times 15 \times 300$  см з фізико-механічними характеристиками прийнятими для дерева сосни та арматурою А500С, яка встановлена по краях поперечного перерізу.

Проведено вибір оптимального варіанту підсилення пасивним однорідним та комбінованим армуванням елементів з дерева, що працюють на згин для збільшення несучої здатності за першою групою граничних станів.

Розроблено рекомендації з підсилення пасивним комбінованим армуванням елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин для отримання найкращого ефекту збільшення несучої здатності за другою групою граничних станів. Розроблено методичку прогнозування роботи елемента з цільної та клеєної деревини, що працює на згин з комбінованим армуванням під час попереднього напруження композитної арматури. Побудовано графіки «момент-кривина» для

різного відсотку армування. Приклад графіку з різними варіантами армування наведений на рис. 8.

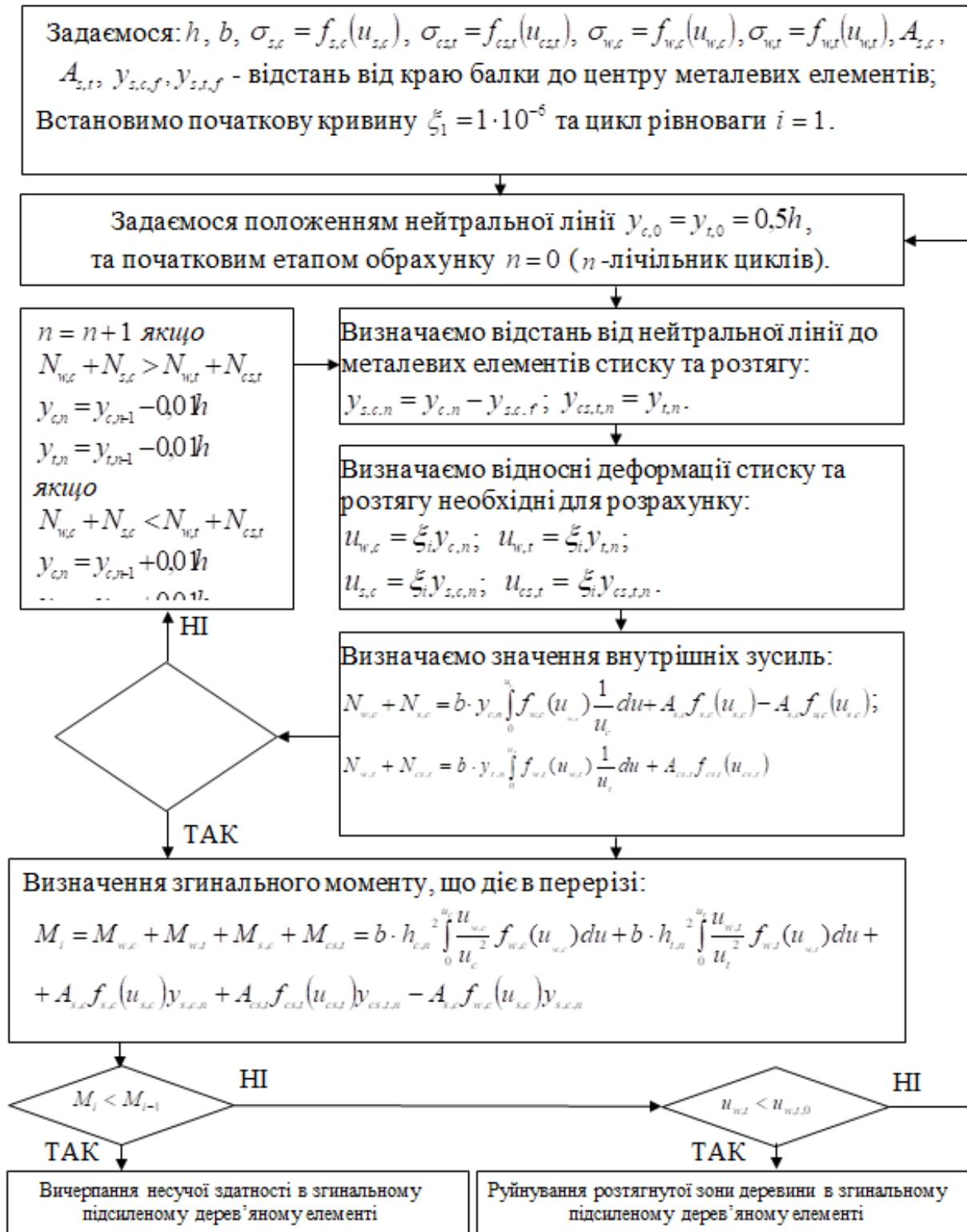


Рис. 7. Алгоритм побудови графіку «момент-кривина» для пасивно підсиленого комбінованим армуванням елемента з деревини

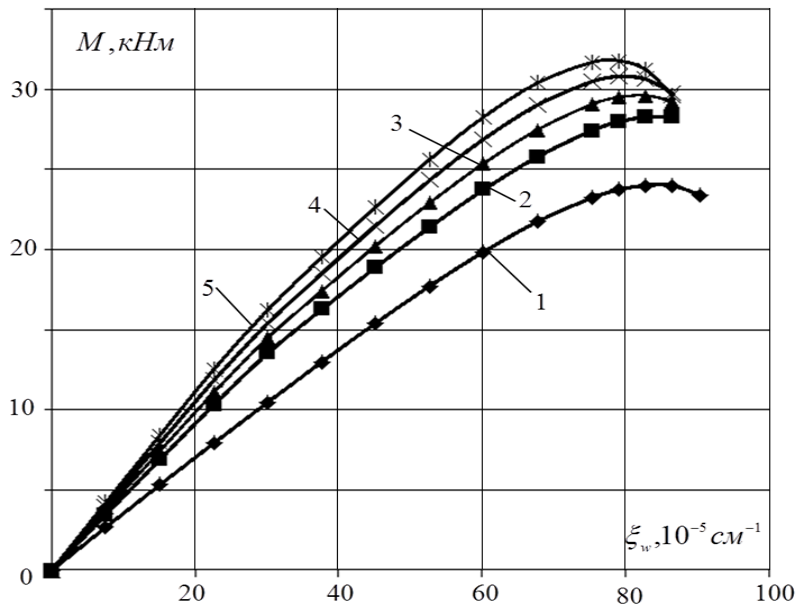


Рис. 8. Графіки «момент-кривина» для елементу з цільної та клеєної деревини, що працює на згин: 1 – без підсилення; 2–5 – армовані в стиснутій зоні сталевією арматурою площею 0,5% від площі перерізу елемента та композитним матеріалом з вуглецю: для графіку 2 – 25%; 3 – 50%; 4 – 75%; 5 – 100% від площі стиснутої арматури

Встановлено, що комбіноване армування значно зменшує прогин елементів, що працюють на згин, а також збільшує несучу здатність. При цьому збільшення несучої здатності поперечного перерізу може досягати більше 100%, а зменшення прогину на 75%. Найкращий ефект від комбіновано армування досягається при армуванні стиснутої та розтягнутої зон деревини, при цьому арматура має бути розміщена якомога далі від центру перерізу. Найефективніше армування рівне 1,5% від площі перерізу для стиснутої зони арматурою А500С та 0,75–1,0% армування вуглецевою стрічкою. Встановлено, що армування балки може збільшити жорсткість елементу, що працює на згин майже в 2–3 рази, що дає можливість зменшувати висоту поперечного перерізу згинального елемента. Але самою суттєвою перевагою комбінованого армування елемента з деревини, що працює на згин, є можливість збільшення прольотів перекриття, що дозволить зменшити загальні витрати на всю будівлю.

Також надані рекомендації з визначення сколюючих (дотичних) напружень, що виникають в елементах, які працюють на згин з комбінованим армуванням.

Описано особливості моделювання роботи та напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутих і розтягнуто-зігнутих комбіновано армованих дерев'яних елементів. Для встановлення напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутих дерев'яних і розтягнуто-зігнутих армованих елементів з деревини необхідно скористатися функціями стиску та розтягу деревини (1), (2), а також функціями, які описують деформування матеріалів, що армують елемент. Роботу металу за стиску можна описати функцією (6), а за розтягу – (7). Для армування стиснуто-зігнутих елементів можливо і використання композитних матеріалів з великим модулем пружності (рис. 1), якому відповідає функція (10). Всі функції, що

використовуються для опису напружено-деформованого стану базуються на залежностях напружень від відносних деформацій. Якщо розглянути напружено-деформований стан поперечного перерізу стиснуто-зігнутого згинального елемента, то можна спостерігати три випадки: перший випадок характеризується наявністю стиснутої і розтягнутої зони (рис. 9); два окремих випадки, де присутні тільки стиснута (рис. 10) або тільки розтягнута зона (рис. 11). Два останні випадки виникають при невеликих значеннях згинального моменту. З рис. 9 видно, що напружено-деформований стан схожий до стану згинального елемента. Основною різницею є дія в перерізі зусилля.

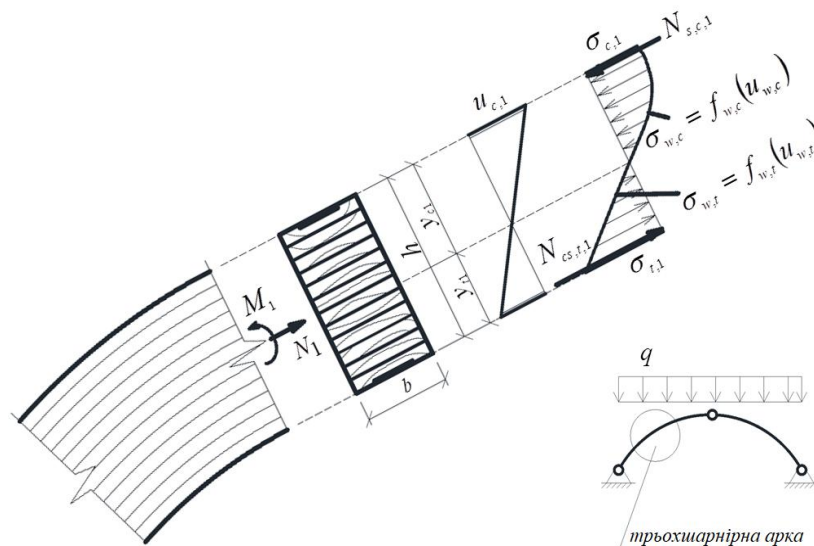


Рис. 9. Напружено-деформований стан криволінійного елемента з клеєної деревини, що працює на стиск зі згином армованого армованого сталевую арматурою (або композиційними матеріалами) з переважачою дією внутрішнього моменту

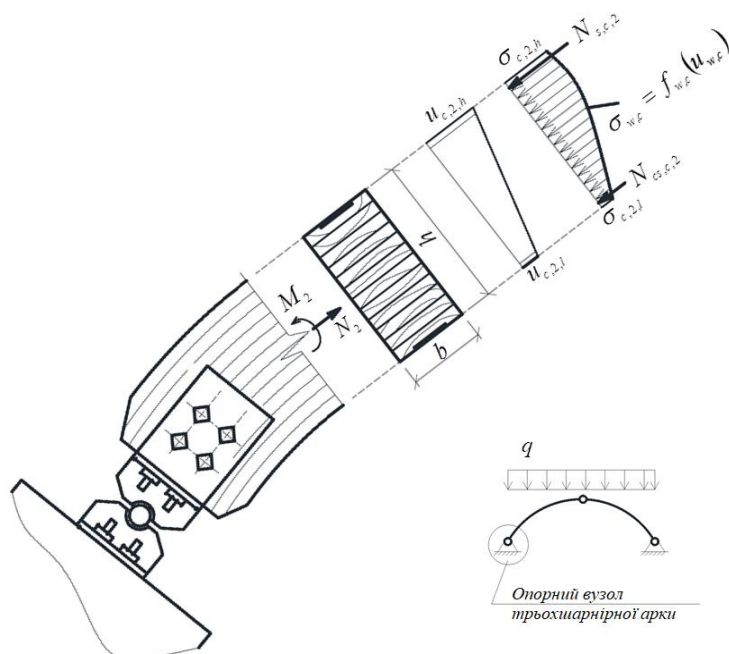


Рис. 10. Напружено-деформований стан криволінійного елемента з клеєної деревини, що працює на стиск зі згином армованого сталевую арматурою (або композиційними матеріалами) з переважачою дією повздовжньої сили

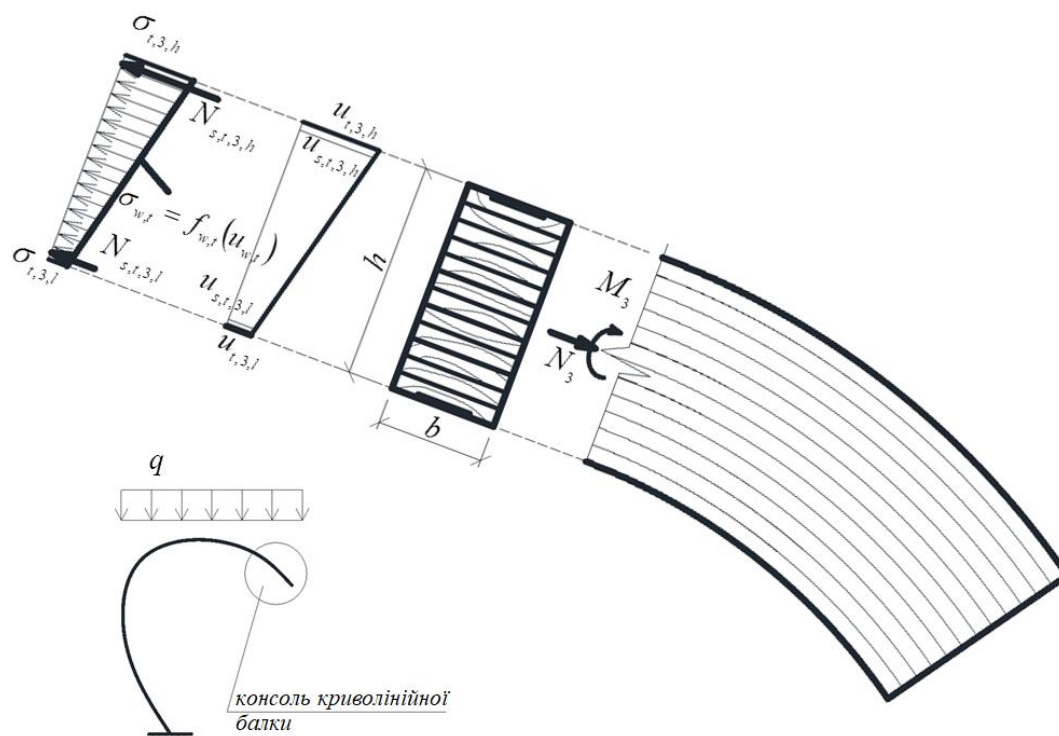


Рис. 11. Напружено-деформований стан криволінійного елемента з клеєної деревини, що працює на розтяг зі згином армованого сталевією арматурою (або композиційними матеріалами) з переважаючою дією сили розтягу

Таблиця рівнянь рівноваги для всіх випадків напружено-деформованих станів елементів, що працюють на стиск зі згином та розтяг зі згином наведено в табл. 1. З таблиці видно, що рівняння рівноваги для всіх випадків не істотно відрізняються. Однак вони відрізняються кількістю внутрішніх сил і математичними знаками.

Таблиця 1

Рівняння рівноваги для всіх випадків напружено-деформованих станів елементів, що працюють на стиск зі згином та розтяг зі згином

| Випадок НДС             | Переважаюча дія              | Наявність зон          | Система рівнянь рівноваги  |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|--|
| Стиснуто-зігнутий НДС   | внутрішнього моменту         | зона стиску та розтягу | $\begin{cases} N_1 - N_{w,c,1} - N_{s,c,1} + N_{w,t,1} + N_{cs,t,1} = 0 \\ M_1 + M_{w,c,1} + M_{w,t,1} + M_{s,c,1} + M_{cs,t,1} = 0 \end{cases}$   |
|                         | стискаючої внутрішньої сили  | тільки зона стиску     | $\begin{cases} N_2 - N_{s,c,2} - N_{w,c,2} - N_{cs,c,2} = 0 \\ M_2 + M_{w,c,2} + M_{s,c,2} + M_{cs,c,2} = 0 \end{cases}$                           |
| Розтягнуто-зігнутий НДС | розтягуючої внутрішньої сили | тільки зона розтягу    | $\begin{cases} N_3 - N_{s,t,3,l} - N_{w,t,3} - N_{s,t,2,h} = 0 \\ -M_3 + M_{w,t,3} + M_{s,t,3,h} + M_{cs,t,3,h} = 0 \end{cases}$                   |
|                         | внутрішнього моменту         | зона стиску та розтягу | $\begin{cases} -N_4 - N_{w,t,4} - N_{s,t,4} + N_{w,c,4} + N_{cs,c,4} = 0 \\ -M_4 + M_{w,c,4} + M_{w,t,4} + M_{s,c,4} + M_{cs,t,4} = 0 \end{cases}$ |

Основною відмінністю є врахування розтягу і стиску за діаграмами деформації матеріалу. Діаграми розтягу і стиску деревини абсолютно різні. І використання матеріалів для армування теж мають свої особливості. Розтягнуту і стиснуту зону можна армувати металевою арматурою. Але в зоні розтягу можливе армування композитною арматурою чи стрічками з композитних матеріалів.

Проведено розрахунок максимально можливого попереднього напруження композитної арматури в елементах з деревини, які працюють на згин. Показано етапи напружено-деформованого стану на різних стадіях попереднього напруження елемента з деревини, який працює на згин. Попереднє напруження включає в себе такі етапи:

1. Створюємо в елементі, що працює на згин попередній вигин, діючи на елемент зовнішнім розрахунковим навантаженням (рис. 12).

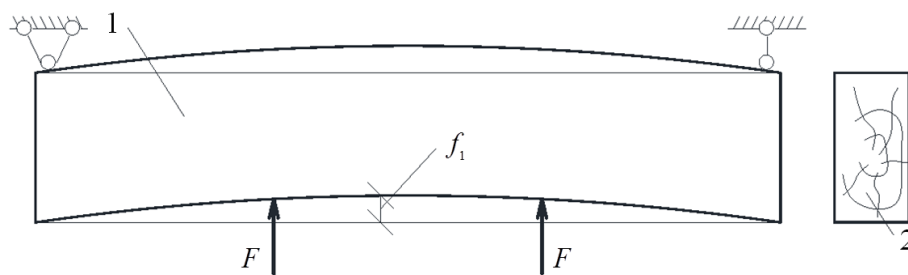


Рис. 12. Створення вигину елемента з деревини, що працює на згин для створення попереднього напруження: 1 – елемент з деревини, що працює на згин; 2 – поперечний переріз елемента з деревини, що працює на згин;  $f_1$  – попередній вигин елемента;  $F$  – зосереджена сила

2. Встановлюємо армуючий елемент в нижню зону елемента з деревини, що працює на згин та за допомогою полімерного клею кріпимо його (рис. 13).

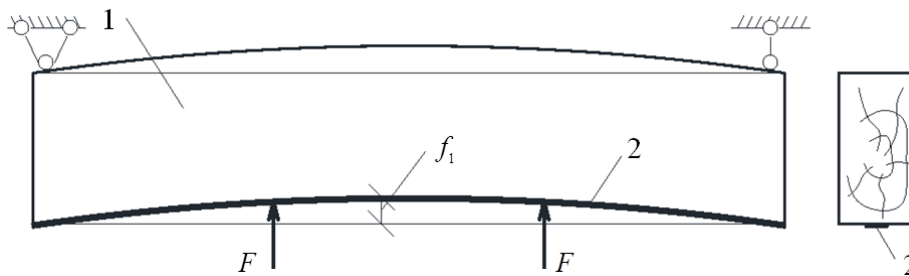


Рис. 13. Вклеювання армуючого елемента в розтягнуту зону елемента з деревини, що працює на згин: 1 – елемент з деревини, що працює на згин; 2 – армуючий матеріал;  $f_1$  – попередній вигин елемента;  $F$  – зосереджена сила

3. Знімаємо зосереджене зовнішнє навантаження  $F$ , яким ми створювали вигин у елементі з деревини, що працює на згин та створюємо розрахунковий від'ємний вигин (рис. 14). В цьому положенні потрібно завершити армування протилежної зони згинального елемента з деревини, вставивши в пази сталеву арматуру і закріпивши її за допомогою розчину створеного з епоксидного клею та піску.

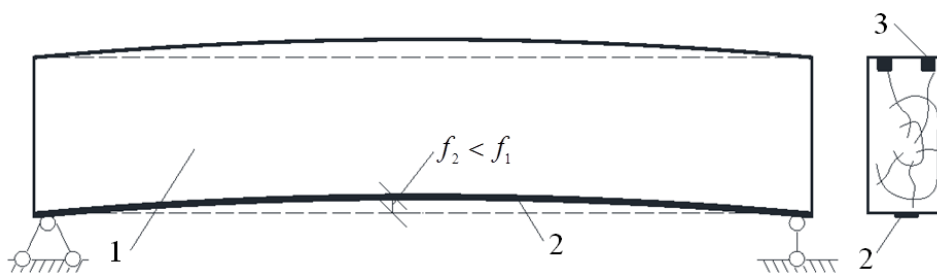


Рис. 14. Вклеювання армуючого елемента в стиснуту зону елемента з деревини, що працює на згин: 1 – елемент з деревини, що працює на згин; 2 – арматура розтягнутої зони; 3 – арматура стиснутої зони;  $f_1$  – попередній вигин елемента;  $f_2$  – залишковий вигин;  $F$  – зосереджена сила

Розглянуто альтернативні способи попереднього напруження елементів з деревини, що працює на згин: 1) з початковим напруженням стиснутої зони; 2) з одночасним вклеюванням армуючих елементів; 3) з початковим напруженням армованого елемента в розтягнутій зоні. Проаналізовано переваги та недоліки кожного з них. Встановлено, що одним із недоліків деревини при попередньому напруженні є низька жорсткість. Водночас для даної методики попереднього напруження вона стає перевагою. Можливість надання великого попереднього вигину елементу з деревини дозволяє виконати достатнє попереднє напруження. Отримані рівні попереднього напруження елементів з деревини, що працюють на згин наведено на рис. 15.

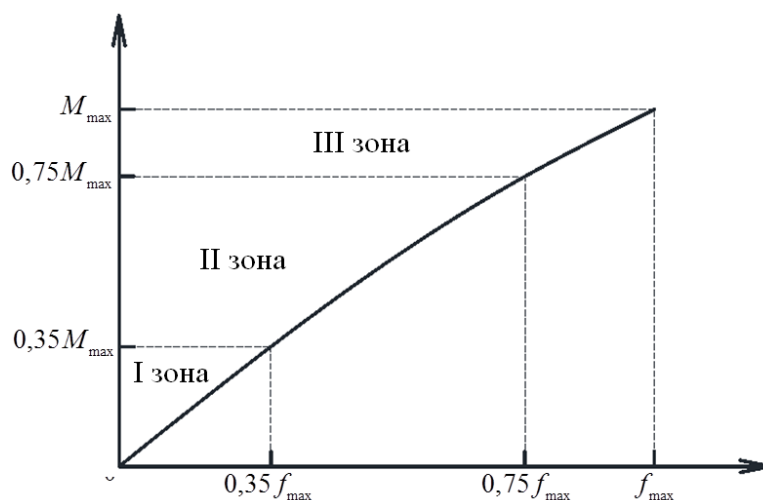


Рис. 15. Рівні попереднього напруження для елемента з деревини, що працює на згин

Найоптимальніший варіант для попереднього напруження знаходиться в 2 зоні. Ця ділянка знаходиться в межах від 0,35 до 0,75 від максимального прогину при, якому відбувається руйнування балки. Описано графіки «момент-кривина» для попереднього напруження елемента з деревини, що працює на згин, а також графіки при роботі цього елемента (рис. 16).

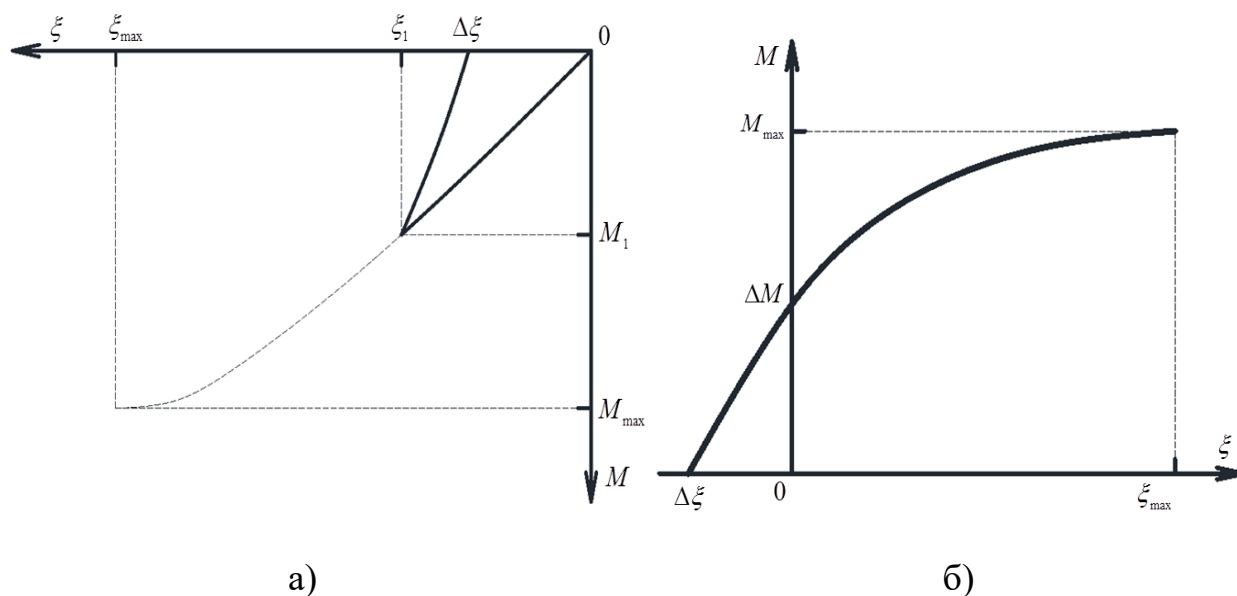


Рис. 16. Графік «момент-кривина» попереднього напруження елементу з деревини, що працює на згин: а) при попередньому напруженні б) при випробуванні

Також приведено особливості розрахунку напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутих і розтягнуто-зігнутих комбіновано армованих елементів з деревини.

**В четвертому розділі** розроблено програму та методику експериментальних досліджень. Обсяг випробувань описаний в табл. 2.

Також в табл. 2 наведено та обґрунтовано розміри зразків призм деревини для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу. Детально описано виготовлення дослідних балок з цільної та клеєної деревини.

Велику увагу приділено процесу виготовлення дослідних зразків із клеєної деревини з пасивним комбінованим армуванням (рис. 17). Ці елементи армувалися сталевією арматурою в стиснутій зоні та композитною вуглецевою стрічкою Sika CarboDur S-512 в розтягнутій зоні.

Розглянуто найпростіші способи створення попереднього напруження з використанням вуглецевої стрічки та запропоновано новий технологічний процес виготовлення попередньо напружених елементів з деревини. На рис. 18 показаний процес приклеювання вуглецевої стрічки під навантаженням.

Описано силові обладнання, вимірювальні прилади, що використовувалися для експериментальних досліджень та схеми їх розміщення.

Детально розглянуто та представлено процес випробування дослідних зразків балок з цільної та клеєної деревини з пасивним та попередньо напруженим армуванням. Наведено отримані результати експериментальних досліджень, що відповідають обсягу досліджень приведених в табл. 2.

## Обсяг експериментальних досліджень

| № серії                        | Вид зразків  | Позначення та кількість зразків                                     | Мета та предмет дослідження  |
|--------------------------------|--|---|--|
| Допоміжна серія                |  |   |  |
| Допоміжна серія                | Призми з цільної деревини<br>30x30x120 мм<br>в кількості 6 шт.                 | PS  | Визначення міцності, побудова діаграм деформування цільної деревини вздовж волокон та визначення критичних та граничних деформацій |
|                                | Призми з клеєної деревини<br>30x30x120 мм<br>в кількості 6 шт.                 | PG  | Визначення міцності, побудова діаграм деформування клеєної деревини вздовж волокон та визначення критичних та граничних деформацій |
| Основна серія                  |  |   |  |
| Серія балок з цільної деревини | Балки з цільної деревини<br>100x150x3000 мм                                    | SB  | Робота балок із цільної деревини за одноразових навантажень  |
|                                | Балки з цільної деревини з пасивним комбінованим армуванням<br>100x150x3000 мм | SRB-12<br>(2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512)                        | Робота балок із цільної деревини з пасивним комбінованим армуванням за дії одноразових навантажень                                 |
|                                | Балки з цільної деревини з попередньо напруженим армуванням<br>100x150x3000 мм | SRB30 (Prst),<br>SRB45 (Prst)<br>(2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512) | Робота балок із цільної деревини з попередньо напруженим комбінованим армуванням за дії одноразових навантажень                    |
| Серія балок з клеєної деревини | Балки з клеєної деревини<br>100x150x3000 мм                                    | GB-A, GB-B  | Робота балок з клеєної деревини за дії одноразового статичного навантаження  |
|                                | Балки з клеєної деревини з пасивним армуванням<br>100x150x3000 мм              | GRB-12A,<br>GRB-12B<br>2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512             | Робота балок з клеєної деревини із пасивним комбінованим армуванням за дії одноразових навантажень                                 |
|                                | Балки з клеєної деревини з попередньо напруженим армуванням<br>100x150x3000 мм | GRB-12 (Prst)<br>(2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512)                 | Робота балок з клеєної деревини з попередньо напруженим комбінованим армуванням за дії одноразових навантажень                     |



Рис. 17. Процес виготовлення дослідних зразків із клеєної деревини



Рис. 18. Процес приклеюванні композитної стрічкової арматури Sika CarboDur S-512 до деревини балки

**В п'ятому розділі** наведено результати теоретичного моделювання та експериментальних досліджень елементів з цільної деревини з комбінованим армуванням з попереднім напруженням та без нього, які працюють на згин. Проведено порівняння теоретичних та експериментальних даних, а також отриманих графіків «момент-кривина» та діаграм прогинів балок з цільної деревини серії SB, SRB та SRB (Prst).

Проаналізовано напружено-деформований стан балок під час створення попереднього напруження у вуглецевій стрічці Sika CarboDur S-512 та з урахуванням роботи арматури в стиснутій зоні після створення попереднього напруження. Встановлено, що вуглецева стрічка є ефективною для використання в балках з деревини, як елементу, що зазнає попереднього напруження, водночас її краще використовувати в комбінації зі сталевую арматурою.

Отримано експериментальні діаграми залежності моменту від кривини поперечного перерізу для попередньо напружених балок з цільної деревини для балки SBR30 (Prst) (рис. 19). Відсоток зростання моменту, при якому настає граничний прогин для досліджуваних балок, що працюють на згин, показано в табл. 3.

Було доведено, що клейовий шов з композитного клею Sikadur-30 створює умови для відмінної сумісної роботи деревини та вуглецевої стрічки Sika CarboDur S-512. Проведена статистична обробка, показала, що отримані експериментальні дані «момент – кривина» та «момент – прогин» мають розбіжність із теоретично змодельованими даними в межах  $\pm 10\%$ .

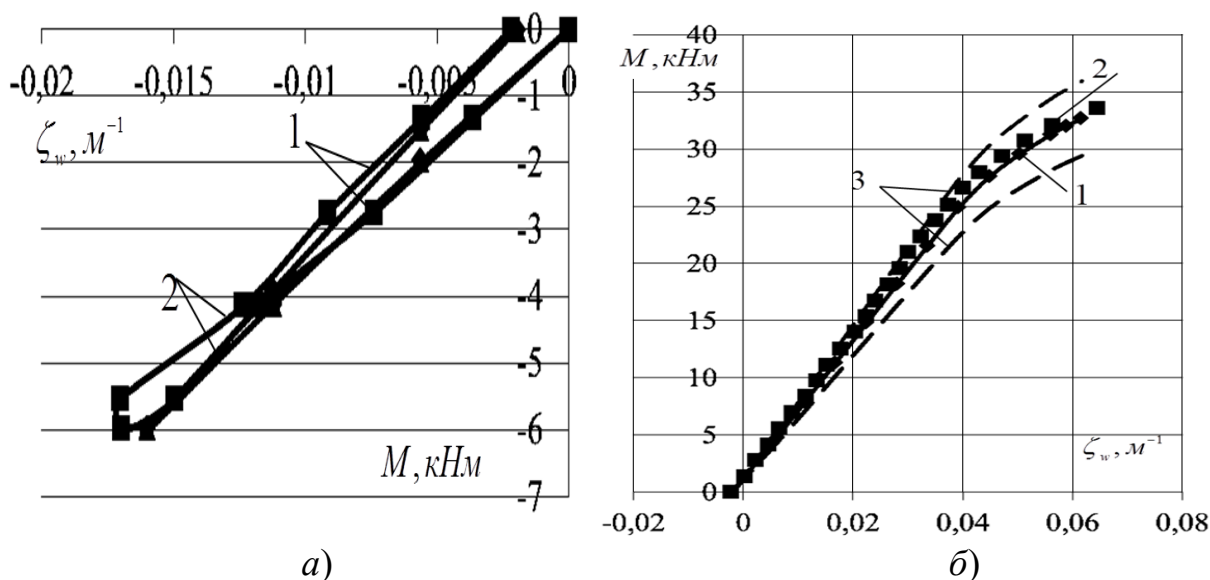


Рис. 19. Теоретичні (1) та експериментальні значення (2) кривини в залежності від прикладеного навантаження в середньому перерізі балки SBR30(Prst) при:  
а) виконанні попереднього напруження; б) при випробуванні балок

Таблиця 3

Зростання несучої здатності балок з цільної деревини за другою групою граничних станів внаслідок різних видів армування

| № з/п | Позначення  | Армування  | К-сть зразків | Граничний момент, (кНм) | Відсоток зростання, % |
|-------|-------------|--|---------------|-------------------------|-----------------------|
| 1     | SB          | неармувана   | 1             | 9,66                    | -                     |
| 2     | SBR         | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 5см                                       | 1             | 15,65                   | 62                    |
| 3     | SBR30(Prst) | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 5см (рівень попереднього напруження 0,3)  | 1             | 18,04                   | 86                    |
|       | SBR45(Prst) | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 5см (рівень попереднього напруження 0,45) | 1             | 19,03                   | 97                    |

Пасивне комбіноване армування в стиснутій зоні двома стержнями сталеві арматури діаметром 12мм класу А500С та вуглецевою стрічкою Sika CarboDur S-512 балок з цільної деревини збільшило несучу здатність за другою групою граничних станів в 1,62 рази. Попереднє напруження композитної стрічкової арматури Sika CarboDur S-512 комбіновано армованих балок з цільної деревини збільшує несучу здатність за другою групою граничних станів в залежності від рівня вигину в межах 1,86–1,97 рази.

Описано характери руйнувань всіх досліджуваних балок з цільної деревини. Руйнування балок з цільної деревини SBR30(Prst) та SBR45(Prst) з попередньо

напруженим комбінованим армуванням 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 проходило за рахунок сколювання деревини вздовж елемента по площині поблизу нейтральної лінії. Характери руйнування зображені на рис. 20.



Рис. 20. Руйнування балок з цільної деревини SBR30(Prst) та SBR45(Prst) за рахунок сколювання

**Шостий розділ** присвячено верифікації методології моделювання роботи елементів з клеєної деревини, що працюють на згин, на основі експериментальних досліджень. Було описано результати випробувань та експериментально-теоретичних досліджень балок з клеєної деревини. Побудовано графіки «момент-кривина» для балок з клеєної деревини (GB-A, GB-B, GB12-A, GB12-B, GBR12(Prst)), а також графік залежності прогинів від прикладеного навантаження. Графіки для попередньо-напруженої балки GBR12(Prst) зображено на рис. 21.

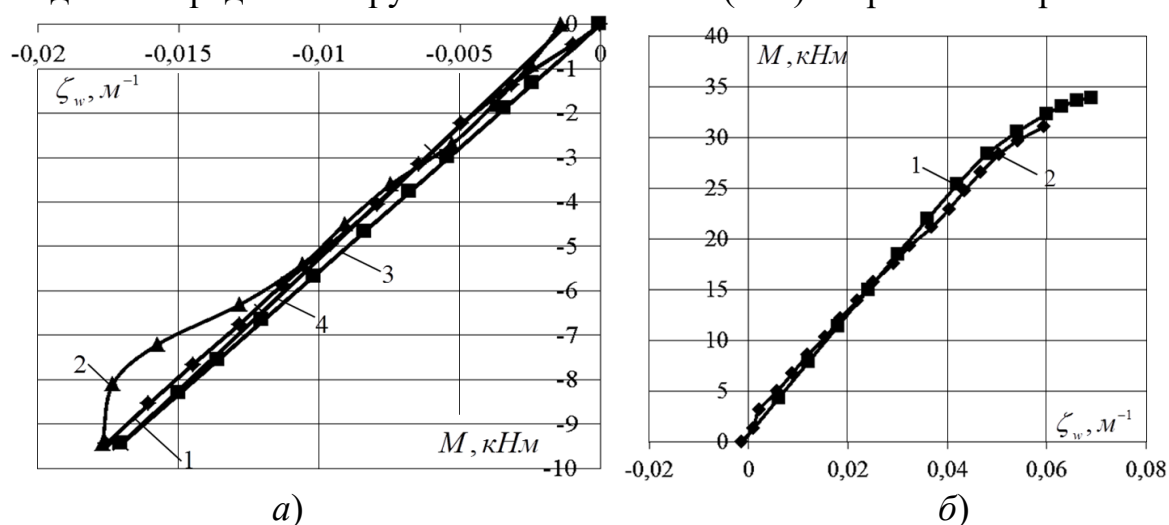


Рис. 21. Графіки «момент-кривина» для попередньо напруженої балки з клеєної деревини GBR12(Prst) при:

а) виконанні попереднього напруження; б) при випробуванні балок

Руйнування попередньо напруженої балки з клеєної деревини GBR12 (Prst) відбувалось шляхом сколювання (рис. 22).

На рис. 23 представлено графіки результатів експериментальних досліджень неармованих та армованих балок з клеєної деревини для визначення та співставлення несучої здатності за другою групою граничних станів. За граничний прогин прийнято прогин, що становить 0,18 мм (1/150 довжини балки). З рис. 23,

видно, що несуча здатність елементів, які працюють на прямий поперечний згин за другою групою граничних станів для балок з клеєної деревини GB-A та GB-B були прийняті, як еталонні, і знаходились в межах 7,5–8.0 кНм. Пасивне комбіноване армування стиснутої 2Ø12 A500C та розтягнутої зон композитною вуглецевою стрічкою Sika CarboDur S-512 перерізом 25×1,2 мм балок GRB-12A та GRB-12B збільшує несучу здатність елементів за другою групою граничних станів в 1,5 рази. Найбільше підвищення порогу несучої здатності дав ефект попереднього напруження балки з клеєної деревини пасивним армуванням за допомогою комбінованого армування стиснутої 2Ø12 A500C та розтягнутої зон композитною вуглецевою стрічкою Sika CarboDur S-512 перерізом 25×1.2мм балок GRB-12(Prst). Цим способом підвищується поріг несучої здатності в два рази.



Рис. 22. Характер руйнування попередньо напруженої комбіновано армованої балки з клеєної деревини GRB-12 (Prst)

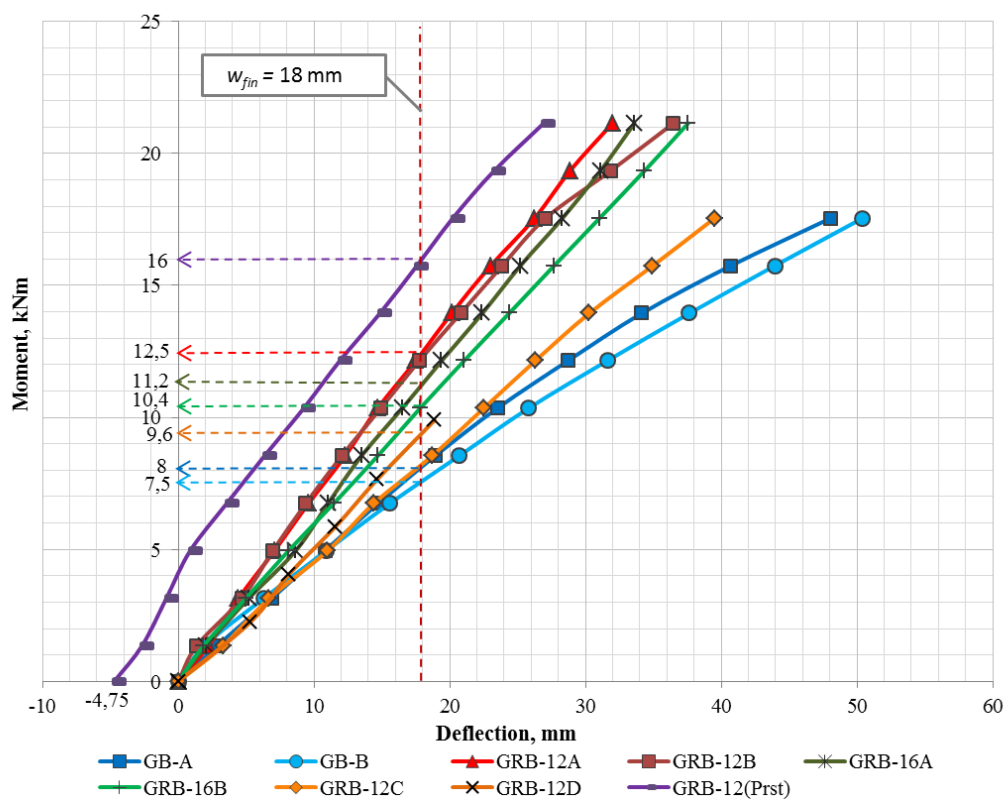


Рис. 23. Діаграми «момент-прогин» з визначенням несучої здатності за другою групою граничних станів досліджуваних балок з клеєної деревини

Геометричні характеристики балок з клеєної деревини та вплив різних способів

армування на несучу здатність згинальних елементів за другою групою граничних станів приведено в табл. 4.

Таблиця 4

Зростання несучої здатності балок з клеєної деревини за другою групою граничних станів внаслідок різних видів армування

| № з/п | Познач.       | Армування   | К-сть зр-ків | Відст. між центрами ар-ри, мм | Граничний момент, (кН•м) | Відсоток зростання, % |
|-------|---------------|---|--------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1     | GB-A          | неармована  | 1            | -                             | 7.5                      | -6                    |
| 2     | GB-B          | неармована  | 1            | -                             | 8.0                      | 0                     |
| 3     | GRB-12C       | 2Ø12 A500C<br>(Стиснута зона)<br>(дані Поліщука М.В.)             | 1            | -                             | 8.0                      | 0                     |
| 4     | GRB-12D       | 2Ø12 A500C<br>(Розтягнута зона)<br>(дані Поліщука М.В.)           | 1            | -                             | 9.6                      | 20                    |
| 5     | GRB-12A       | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512                                  | 1            | 117.6                         | 12.5                     | 56                    |
| 6     | GRB-12B       | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512                                  | 1            | 117,6                         | 12.5                     | 56                    |
| 7     | GRB-16A       | 2Ø16 A500C + Sika CarboDur S-512<br>(дані Поліщук М.В.)           | 1            | 115.6                         | 11.2                     | 40                    |
| 8     | GRB-16B       | 2Ø16 A500C + Sika CarboDur S-512<br>(дані Поліщука М.В.)          | 1            | 115.6                         | 10.4                     | 30                    |
| 9     | GRB-12 (Prst) | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 (Prst)<br>(Попередньо напружена) | 1            | 117,6                         | 16.0                     | 100                   |

Також було проведено верифікації методики моделювання з експериментальними даними Сасовського Т.А. та Сурмая М.І. (рис. 24). Графіки побудовано методом моделювання роботи елемента, що працює на згин для: 1 – балок армованих арматурою сталевую діаметром 10 мм БМ; 2 – балок армованих арматурою сталевую діаметром 10 мм БМ; 3 – балок армованих базальтовою арматурою ББ; 4 – балок армованих композитною арматурою з скловолокна БС; 5 – контрольних балок серії БД. З рис. 24 видно, що для балок серії БД, БС та ББ розбіжність між експериментальними та теоретичними даними складає в межах 4,7%–10,0%. Для балок армованих металевую арматурою розбіжність складає до 15,0%. Всі ці розбіжності визначалися на рівні завантаження не більше 50% від руйнівного, в зоні експлуатаційного навантаження елемента з деревини.

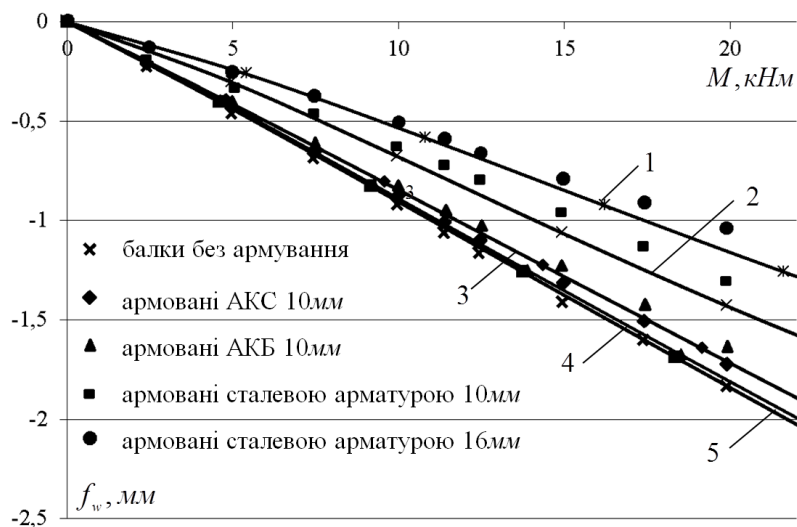


Рис. 24. Порівняння експериментальних даних прогинів отриманих М.І. Сурмаєм з теоретичними даними отриманими автором (1 – для балок армованих арматурою сталевую діаметром 16 мм БМ; 2 – для балок армованих арматурою сталевую діаметром 10 мм БМ; 3 – для балок армованих базальтовою арматурою ББ; 4 – для балок армованих композитною арматурою з скловолокна БС; 5 – для контрольних балок серії БД)

Виконано аналіз результатів числового моделювання балок з деревини за допомогою аналітичної методики розрахунку та програмного комплексу ЛІРА САПР. Були проаналізовані балки без армування SB (контрольні балки) та з армування SBR12. Порівняння отриманих результатів наведено на рис. 25.

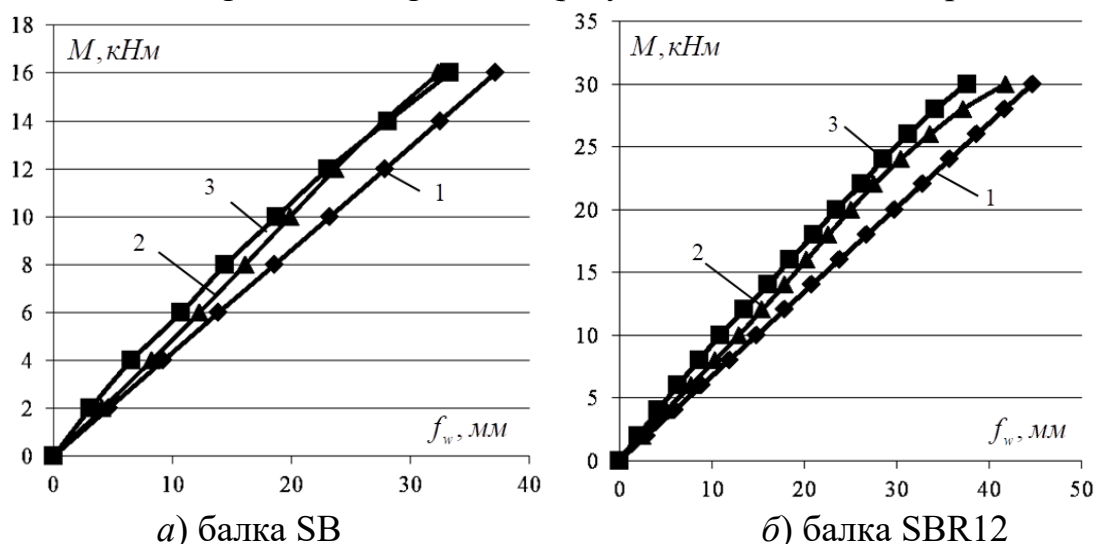


Рис. 25. Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балки SB та SBR12 аналітичною методикою та за допомогою ПК ЛІРА САПР (1 – ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3 – експериментальна балка)

Проведено порівняння прогинів для балок GB-A, GB-B та GB12-A, GB12-B (рис. 26).

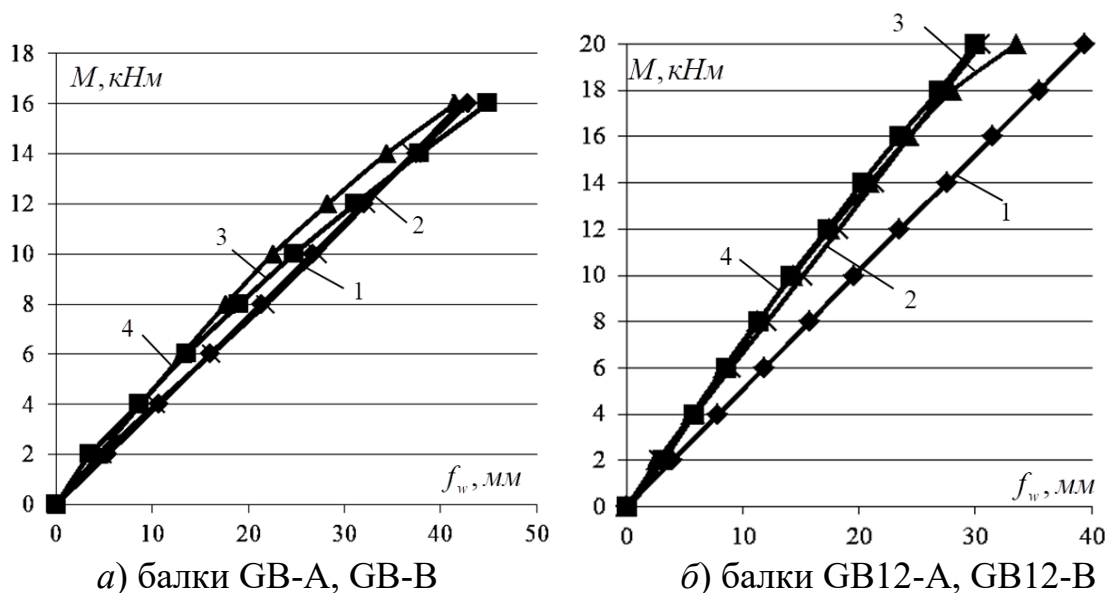


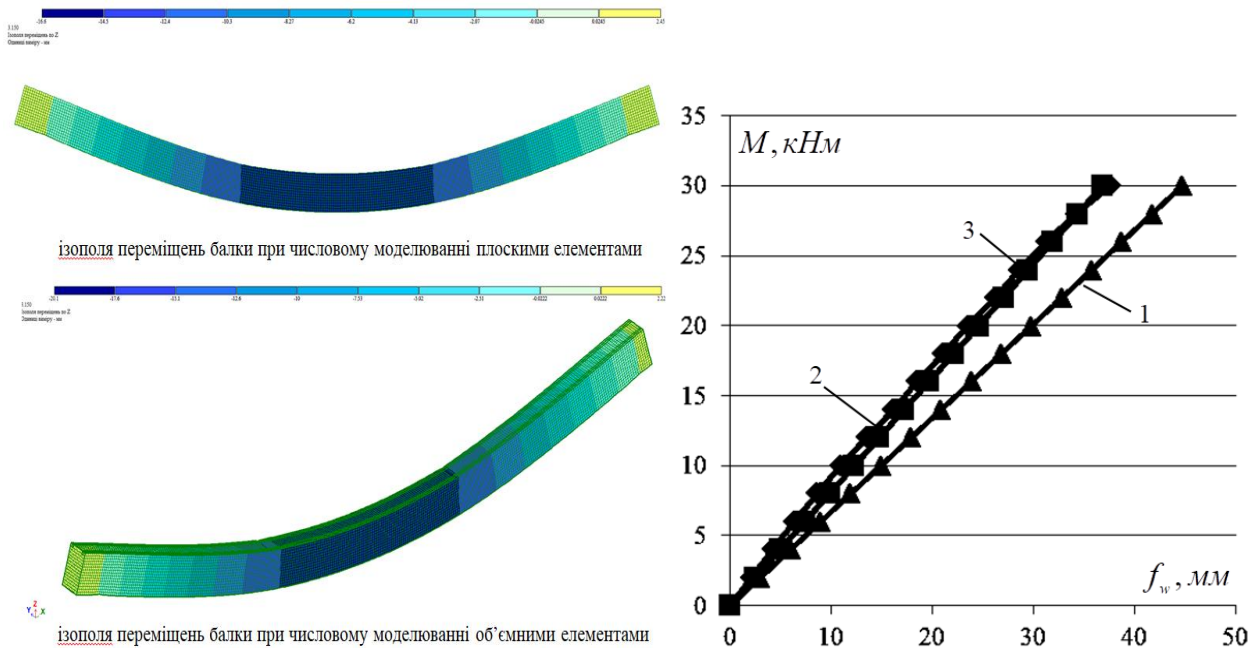
Рис. 26. Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балок GB-A, GB-B та GB12-A, GB12-B за аналітичною методикою та в ПК ЛІРА САПР (1 – прогин в ПК ЛІРА САПР, 2 – аналітична методика, 3, 4 – експериментальні балки GB-A, GB-B та GB12-A, GB12-B)

При статистичному порівнянні отриманих результатів балок з клеєної деревини встановлено, що максимальний прогин визначений за допомогою ПК ЛІРА-САПР по всьому діапазону показує збільшений максимальний прогин, як і у випадку з цільною. Збільшення лежить в межах від 14% до 31%. Запропонована теорія також дає відхилення в більшу сторону, проте воно сягає від 4% до 13%.

В роботі була запропоновано можливість розрахунку балки за допомогою плоских скінченних елементів. Проведене порівняння числового моделювання об'ємними та плоскими елементами в ПК ЛІРА САПР з експериментальними дослідженнями. Розходження в результатах вертикальних переміщень отриманих за розрахунками в ПК ЛІРА САПР з експериментальним прогином складає для числового моделювання плоскими скінченими елементами 7,7%, а для – об'ємними скінченими елементами 30,8%. Графіки отриманого експериментального прогину та вертикальних переміщень зображено на рис. 27.

Проведено розрахунок арки з використанням плоских скінченних елементів за допомогою ЛІРА САПР та за аналітичною методикою з армуванням та без армування. Ізополя вертикальних переміщень на напружень показані на рис. 28. З порівняння видно, що армування не зменшує напруження в розтягнутій зоні арки з деревини, проте зменшує напруження в її стиснутій приблизно на 23%. Так як, значення напружень в стиснутій зоні в неармованій арці були вищими, ніж в розтягнутій, то армування призводить до позитивного ефекту вирівнювання напружень в поперечному перерізі. В результаті числового моделювання двома методиками було встановлено, що запропонована аналітична методика розрахунку близька до розрахунків в програмному комплексі ЛІРА САПР і є придатною до використання для моделювання напружено-деформованого стану арок з клеєної деревини комбіновано армованих і неармованих. При співставленні видно, що програмний комплекс ЛІРА САПР показує вищі значення напружень, ніж

аналітична методика розрахунку: для напружень в стиснутій зоні деревини в середньому на 4,2%; для напружень розтягнутої – 26,7%; для напружень арматури 11,3%; для вуглецевої стрічки 9,6%.



а) ізополя вертикальних переміщень      б) порівняння вертикальних переміщень

Рис. 27. Порівняння результатів отриманих прогинів при числовому моделюванні плоскими та об'ємними скінченими елементами в ПК ЛІРА САПР та експериментальних досліджень для балки SBR12 (1 – ПК ЛІРА САПР об'ємні скінчені елементи, 2 – ПК ЛІРА САПР плоскі скінчені елементи, 3 – експериментальна балка)

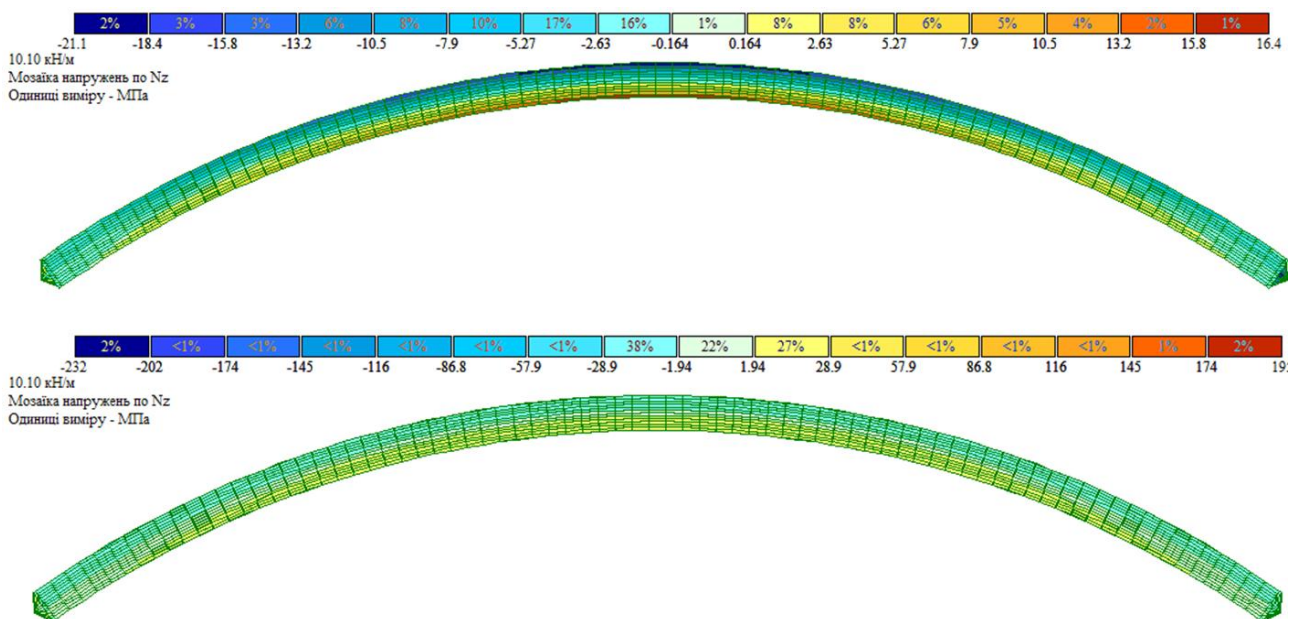


Рис. 28. Ізополя повздовжніх напружень для неармованої та армованої арки

Також виконано моделювання роботи армованої та неармованої криволінійної конструкції з клеєної деревини. Для цього, за допомогою програмного комплексу ЛІРА САПР було створено числову модель криволінійної конструкції, що застосовується, як покриття. Форму криволінійній конструкції здійснюється шляхом вигинання дерев'яних дощок при її виготовленні з подальшим склеюванням. Змодельовану криволінійну конструкцію було порашовано з армуванням та без нього. Отримано результати вертикальних та горизонтальних переміщень криволінійної конструкції, а також напружень деревини та армуючих матеріалів. Ізополя повздовжніх напружень для неармованої та армованої криволінійних балок зображено на рис. 29.

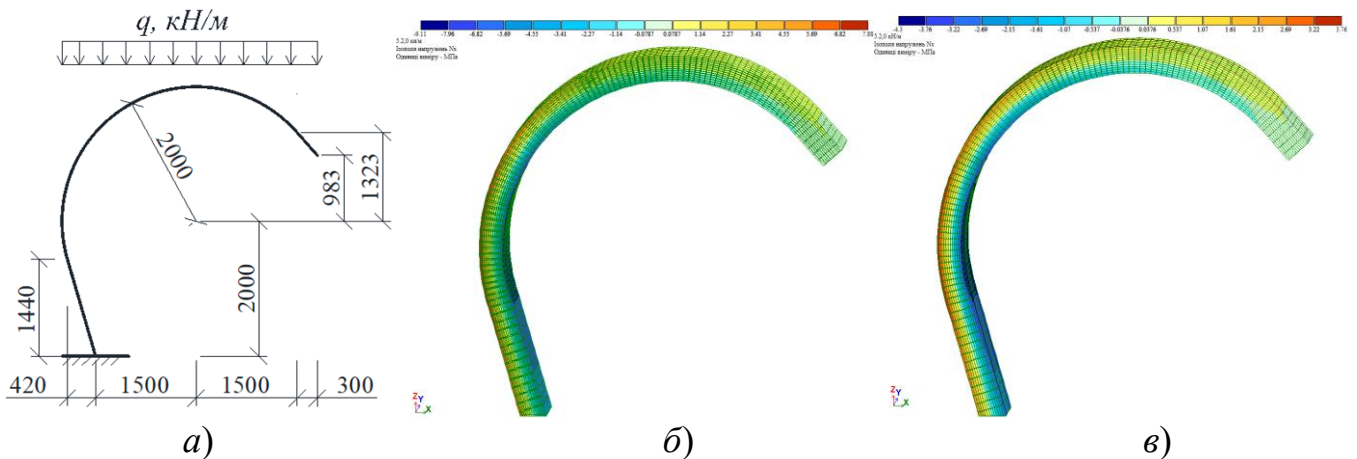


Рис. 29. Моделювання криволінійної конструкції з клеєної деревини:  
 а) розрахункова схема; б) повздовжні напруження не армованої конструкції;  
 в) повздовжні напруження армованої конструкції

З вказаних вище отриманих результатів видно, що армування суттєво знижує напруження в деревині. Зниження напружень шляхом встановлення арматури позитивно впливає на переміщення, при цьому зменшуючи їх. Проаналізувавши результати числового дослідження криволінійної конструкції з клеєної деревини можна дійти висновку, що армування для таких елементів, де частина є консольною, є дуже ефективним. В результаті армування 1,4% для стиснутої і 1,4% для розтягнутої зон максимальні напруження стиску та розтягу в деревині зменшилися на 52%. При цьому зменшилися і максимальні переміщення в балці по вертикальній осі з 67,6 мм до 33,2 мм, що склало зменшення на 50,9%, та по горизонтальній осі з 35,6 мм до 17,2 мм, що склало 51,7%. Для співставлення даних отриманих шляхом чисельного моделювання з аналітичною методикою були побудовані епюри внутрішніх зусиль, що виникають в криволінійній конструкції. В результаті числового моделювання встановлено, що ПК ЛІРА САПР показує вищі значення напружень в деревині, ніж аналітична методика розрахунку. Для напружень в стиснутій зоні деревини в середньому напруження більші на 12,6%, а напруження розтягнутої зони на 8,9%. При цьому зворотня картина спостерігається в арматурних стержнях. Напруження в арматурі, отримані в ПК ЛІРА САПР, менші при розрахунку за запропонованою в роботі аналітичною методикою, в розтягнутій арматурі вони менші на 9,7%, а в стиснутій на 4,9%.

Проведені чисельні дослідження та апробація запропонованої аналітичної методики розрахунку армованих та комбіновано армованих елементів з цільної та клеєної деревини дозволяє зробити висновок про можливість застосування останньої для елементів, які працюють на стиск зі згином та розтяг зі згином.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота вирішує важливу науково-технічну проблему з підвищення жорсткості елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, стиск або розтяг зі згином шляхом використання різних армуючих матеріалів і їх моделювання. А також проблему розрахунку шляхом врахування сучасних теорій про міцнісні та деформаційні характеристики матеріалів, що, в свою чергу, дозволяє підвищити ефективність використання елементів з цільної та клеєної деревини та розширити сферу їх застосування. На основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Досліджені сучасні вітчизні та закордонні наукові праці дозволили розвинути теоретичні основи моделювання роботи, розрахунку та конструювання елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин шляхом комплексного врахування міцнісних та деформативних властивостей деревини, сталі, композиційних армуючих матеріалів та їх сумісної роботи. Проведена оцінка сучасних знань про армовані конструкції з цільної та клеєної деревини вказує на необхідність ґрунтовного вивчення роботи елементів, що працюють на згин, а також стиск та розтяг зі згином з комбінованим армуванням сталевую і композитною арматурою та з комбінованим попередньо напруженим армуванням. Доведена необхідність розроблення рекомендацій щодо проєктування конструкцій з цільної та клеєної деревини армованих композитною арматурою, за наявності комбінованого армування, та з попереднім напруженням арматури.

2. На основі детального аналізу міцнісних та деформативних властивостей деревини обґрунтовано та сформульовано основні гіпотези, передумови та допущення, на базі яких удосконалено методичні підходи моделювання, оцінки напружено-деформованого стану нормального поперечного перерізу, а також роботи елементів із цільної та клеєної деревини за дії короткочасних навантажень з урахуванням оптимізованих діаграм деформування матеріалу. Удосконалення методичних підходів дозволяє прогнозувати роботу згинальних елементів на різних ступенях завантаження.

3. Вперше створено методологічні засади моделювання та розрахунку елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з різними способами армування. Методологічні засади використовують: апроксимовані функції діаграм «момент-кривина»; функції деформування армуючих матеріалів; методику побудови діаграми деформування « $\sigma - u$ » на стиск для деревини на основі експериментальних досліджень елементів з цільної та клеєної деревини; методику визначення дотичних напружень і прогинів армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, запропоновано механізм побудови та побудовані епюри максимальних дотичних (сколюючих) напружень, що виникають по довжині балок. Новостворені методологічні засади моделювання та розрахунку згинальних елементів з цільної та клеєної деревини, що

працюють на згин та стиск зі згином з різними способами армування надали можливість уточнити визначення несучої здатності, забезпечили прогнозування роботи та вдосконалили їх конструювання.

4. Запропоновано комплекс методик моделювання роботи, елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з комбінованим армуванням, під час їх попереднього напруження та експлуатації. До яких входять: методика визначення напружено-деформованого стану в поперечному перерізі на етапі виготовлення та експлуатації попередньо напружених елементів; методика побудови графіків «момент-кривина»; методика визначення прогинів (переміщень) з використанням графіків «момент-кривина» та методика визначення дотичних (сколюючих) напружень з урахуванням нелінійності деформування та використання графіків «момент-кривина». Запропонований комплекс методик моделювання роботи, попередньо-напружених армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з комбінованим армуванням, дозволяє прогнозувати процес попереднього напруження та роботу даних елементів на різних етапах, визначити несучу здатність даних конструкцій та надати рекомендації до їх конструювання.

5. Удосконалено науково-прикладний підхід зі встановлення граничних станів за першою та другою групами для елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням шляхом використання комплексу методик моделювання роботи елементів, що включає: метод визначення дотичних (сколюючих) та нормальних напружень, а також визначення прогину. Науково-прикладний підхід дозволяє зробити перевірку несучої здатності, що в свою чергу включає перевірки: напружень в нормальному перерізі, виникнення дотичних напружень та досягнення граничного значення прогину, а також допомагає виконати конструювання елемента з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, а це в свою чергу, є необхідним у вирішенні інженерних завдань.

6. Проведено детальний аналіз роботи попередньо напружених елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з комбінованим армуванням та без армування, з попереднім напруженням та без. В ході якого розроблено алгоритм для побудови графіку «момент-кривина» для пасивно підсиленого комбінованим армуванням елемента з деревини. Здійснене математичне моделювання роботи елементів, що працюють на згин з пасивним комбінованим армуванням показало, що збільшення відсотка композитного матеріалу в розтягнутій зоні відносно металевого армування стиснутої зони не приводить до суттєвих змін у зменшенні кривини. Доведено, що найкращий варіант армування знаходиться в межах від 1 до 2% від площі перерізу, металом в стиснутій зоні та 75–100% композитної арматури від сталевий арматури в стиснутій зоні. В результаті використання такого комбінованого армування елемента з деревини граничний момент, який може сприйняти переріз, зростає на 103%, а за цього самого моменту кривина зменшується на 69%. Також, розроблено методику побудови діаграм появи максимальних дотичних напружень в нормальних поперечних перерізах по довжині елемента, що працює на згин. На основі використання методики визначення дотичних напружень, були побудовані діаграми дотичних напружень, доведено, що на діаграмах існують екстремуми зростання всередині прольоту поблизу місця



теоретично отриманими даними, що одержані шляхом моделювання. За результатами обрахунку експериментальних даних, приведених в табл. 6.3, видно, що в усіх балках з клеєної деревини, як неармованих, так і комбіновано армованих, нейтральна лінія у перед руйнівному стані не співпадає з центром ваги поперечного перерізу згинального елемента.

10. Шляхом аналізу отриманих експериментальних даних досліджень елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з комбінованим армуванням було встановлено вплив пасивного та попередньо напруженого армування. Визначено, що несуча здатність за другою групою граничних станів елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин зростає при їх армуванні. Для досліджуваних зразків з пасивним армуванням, балка SBK – 67%, GBR-12A та GBR-12B – 56%, GBR-16A та GBR-16B – 30–40%. Для попередньо напружених балок несуча здатність за другою групою граничних станів збільшується SBR30(Prst) – 86%, SBR45(Prst) – 97% та GBR-12(Prst) – 100% в порівнянні з балками без армування. Попереднє напруження збільшує несучу здатність за другою групою граничних станів SBR30(Prst) – 19%, SBR45(Prst) – 28%, GBR-12(Prst) – 44%. Можна зробити висновок, що армування та попереднє напруження збільшує несучу здатність за другою групою граничних станів. Руйнування, практично, всіх балок з клеєної деревини з пасивно комбінованим армуванням та попередньо напруженим комбінованим армуванням проходить за рахунок сколювання деревини поблизу нейтральної осі елемента.

11. Удосконалено спосіб верифікації методик моделювання роботи армованих елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин шляхом співставлення отриманих даних на основі експериментальних та теоретичних досліджень з використанням діаграм «момент-кривина». Проведена верифікація методик моделювання роботи армованих конструкцій з деревини на основі статистичного порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними. Порівняння експериментальних та теоретичних даних проводилось шляхом порівняння отриманих діаграм «момент-кривина» та «момент-прогин». Проведено статистичний аналіз збіжності експериментальних та теоретичних даних з методиками деформаційного моделювання та ПК ЛПА САПР. Встановлено, що збіжність діаграм на нижніх рівнях часто виходить за межі 15% за рахунок невисокої точності вимірювальних приладів, при цьому доведена достатньо висока збіжність діаграм на високих рівнях в межах 10%. Спосіб верифікації за допомогою діаграм «момент-кривина» дозволив порівняти теоретичні та експериментальні дані під час виготовлення та роботи згинальних елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з різним видом армування та попереднім напруженням.

12. Розроблено методику розрахунку армованих різними матеріалами елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, стиск зі згином та розтяг зі згином з застосуванням методу скінчених елементів в програмному комплексі ЛПА САПР. Методика дозволяє враховувати різні методи армування, різними матеріалами для елементів довільної геометрії та умов роботи.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових фахових виданнях України (категорія Б)*

1. **Гомон П. С.** Методика побудови діаграми деформування « $\sigma - \varepsilon$ » для деревини на основі експериментальних досліджень згинальних елементів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди*. Рівне : НУВГП, 2014. Вип. 29. С. 102–107.
2. **Гомон П. С.,** Савицький В. В., Поліщук М. В. Розрахунок напружено-деформованого стану підсилених дерев'яних балок прямокутного перерізу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2021. Вип. 39. С. 221–229. (авторський внесок – методичний підхід до розрахунку комбіновано армованих дерев'яних балок).
3. Бабіч В. Є., **Гомон П. С.,** Пращур О. Шляхи підвищення жорсткості елементів з цільної та клеєної деревини за поперечного згину. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2021. Вип. 40. С. 97–104. (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень комбіновано армованих дерев'яних балок).
4. **Гомон П. С.** Апроксимація діаграми «момент-кривина» дерев'яних армованих та неармованих балок прямокутного перерізу. *Містобудування та територіальне планування*. Київ : КНУБА, 2021. № 78. С. 157–165.
5. **Гомон П. С.** Особливості побудови діаграми «момент-кривина» підсилених балок з деревини прямокутного перерізу. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2021. Вип. 3(95). С. 128–138.
6. **Гомон П. С.** Аналіз використання металевої та неметалевої арматури для підсилення дерев'яних елементів та конструкцій. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ : КНУБА, 2022. Вип. 62. С. 322–332.
7. **Гомон П. С.,** Олексін І. О. Визначення дотичних напружень в дерев'яних балках з врахуванням нелінійності деформування матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 41. С. 126–134. (авторський внесок – методичний підхід до визначення дотичних напружень в дерев'яних балках з врахуванням пружно-пластичності деревини).
8. **Гомон П. С.,** Поліщук М. В. Напружено-деформований стан балок із деревини з комбінованим армуванням на різних рівнях завантажень. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк : ЛНТУ, 2022. Вип. 17. С. 23–30. (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень комбіновано армованих дерев'яних балок, формулювання висновків).
9. **Гомон П. С.,** Поліщук М. В. Прогини підсилених та непідсилених балок прямокутного перерізу з клеєної деревини. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Одеса : ОДАБА, 2022. № 26. С. 88–96. (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень комбіновано армованих дерев'яних балок, формулювання висновків).
10. **Гомон П. С.** Інноваційний спосіб попереднього напруження комбіновано армованих дерев'яних балок. *Містобудування та територіальне планування*. Київ : КНУБА, 2022. № 79. С. 77–86.

11. **Гомон П. С.** Сумісність роботи арматури та деревини в балках, які працюють за поперечного згину. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ : КНУБА, 2022. Вип. 63. С. 327–335.
12. **Гомон П. С.** Моделювання роботи дерев'яної балки з послідовним завантаженням. *Містобудування та територіальне планування*. Київ : КНУБА, 2022. № 80. С. 159–165.
13. **Гомон П. С.** Передумови для прогнозування роботи пасивно армованих згинальних дерев'яних елементів металевими матеріалами. *Містобудування та територіальне планування*. Київ : КНУБА, 2022. № 81. С. 124–132.
14. **Гомон П. С.** Моделювання роботи поперечних перерізів дерев'яних елементів за різних варіантів та відсотків армування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ : КНУБА, 2022. Вип. 64. С. 334–342.
15. **Гомон П. С.** Визначення прогинів дерев'яних згинальних елементів з урахуванням нелінійності деформування деревини. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 2(98). С. 183–192.
16. **Гомон П. С.** Дослідження деяких механічних показників деревини сосни за жорсткого режиму випробувань. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Сер. Архітектура та будівництво*. Львів : ЛНУП, 2022. № 23. С. 41–44.
17. **Гомон П. С.** Визначення напружено-деформованого стану згинальних дерев'яних елементів підсилені композитними та металевими матеріалами. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 42. С. 99–106.
18. **Гомон П. С.** Моделювання роботи підсиленого попередньо напруженого згинального дерев'яного елемента. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Одеса : ОДАБА, 2023. Вип. № 27. С. 59–66.
19. Поліщук М. В., **Гомон П. С.** Робота комбіновано армованих балок з клеєної деревини з попередньо напруженою композитною арматурою. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 43. С. 173–182. (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень попередньо напружених комбіновано армованих дерев'яних балок, формулювання висновків).
20. Бабич Є. М., **Гомон П. С.** Рекомендації щодо проектування згинальних елементів з цільної та клеєної деревини з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 44. С. 133–139. (авторський внесок – загальний підхід, щодо проектування згинальних елементів з деревини з комбінованим армуванням).
21. Бабич Є. М., **Гомон П. С.** Експериментальні дослідження попередньо напружених комбіновано армованих балок з цільної деревини. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2024. Вип. 45. С. 96–108. (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень попередньо напружених комбіновано армованих балок з цільної деревини).

22. Михайловський Д. В., Гомон П. С. Верифікація методик моделювання армованих та неармованих дерев'яних балок. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2024. Вип. 46. С. 237–249. (авторський внесок – проведення, аналіз експериментальних досліджень армованих та неармованих дерев'яних балок та верифікація підходів до моделювання).
23. Михайловський Д. В., Гомон П. С. Дослідження роботи попередньо-напружених дерев'яних балок з клеєної деревини. *Містобудування та територіальне планування*. Київ : КНУБА, 2024. № 87. С. 246–254. (авторський внесок – проведення, аналіз експериментальних досліджень попередньо напружених комбіновано армованих балок з клеєної деревини та верифікація підходів до моделювання).
24. Михайловський Д. В., Гомон П. С. Вплив армування на напружено-деформований стан гнучо клеєної дерев'яної конструкції. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2025. Вип. 47. С. 355–367. (авторський внесок – створення моделей гнучо клеєної комбіновано армованої конструкції з деревини, проведення чисельного експерименту, обробка результатів, формулювання висновків).
25. Михайловський Д. В., Комар М. А., Гомон П. С. Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк : ЛНТУ, 2025. Вип. 23. С. 155–170. (авторський внесок – створення числових моделей дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини, проведення числових досліджень, обробка та аналіз результатів, формулювання висновків).
26. Михайловський Д. В., Комар М. А., Гомон П. С. Чисельне моделювання роботи комбіновано армованої дерев'яної балки за допомогою плоских скінченних елементів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Одеса : ОДАБА, 2025. Вип. № 29. С. 130–141. (авторський внесок – створення числових моделей комбіновано-армованої дерев'яної балки, проведення числових досліджень, обробка та аналіз результатів, формулювання висновків).

**Статті у наукових періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science та категорії A**

27. Gomon P., Babych Y., Polishchuk M., Kysliuk D.Y., Bandura I., Pakholiuk O., Shevchuk A. Deformability of a glued woden beam with pre-stressed composite reinforcement. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 551–558. (Scopus). (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень комбіновано армованих дерев'яних балок).
28. Gomon S. S., Polishchuk M., Homon S., Gomon P., Vereshko O., Melnyk Yu., Boyarska I. Rigidity of combined reinforced glued wood beams. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*. 2020. Vol. 11(1). Special issue XV. Pp. 131–133. (Web of Science). (авторський внесок – аналіз результатів експериментальних досліджень комбіновано армованих дерев'яних балок, формулювання висновків).

29. Homon S., **Gomon P.**, Gomon S., Dovbenko T., Savitskiy V., Matviiuk O., Kulakovskiy L., Bronytskyi V., Bosak A., Chornomaz N. Experimental and statistical studies of the initial module of elasticity and the module of deformations of continuous wood at different ages and moisture. *AD ALTA: Journal Of Interdisciplinary Research*. 2022. Vol. 12 (1). Special issue XXV. Pp. 321–326. (**Web of Science**). (авторський внесок – аналіз результатів експериментальних досліджень, формулювання висновків).
30. Gomon S., **Gomon P.**, Homon S., Polishchuk M., Dovbenko T., Kulakovskiy L. Improving the strength of bending elements of glued wood. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. Pp. 217–222. (**Scopus**). (авторський внесок – проведення та аналіз експериментальних досліджень комбіновано армованих дерев'яних балок).
31. Gomon S., **Gomon P.**, Korniychuck O., Homon S., Dovbenko T., Kulakovskiy L., Boyarska I. Fundamentals of calculation of elements from solid and glued timber with repeated oblique transverse bending, taking into account the criterion of deformation. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*. 2022. Vol. 64(2). Pp. 37–47. (**Scopus**). (авторський внесок – розробка загальної методики розрахунку, формулювання висновків).
32. Homon S., Litnitsky S., **Gomon P.**, Kulakovskiy L., Kutsyna I. Methods for determining the critical deformations of wood with various moisture content. *Scientific Horizons*, 2023. Vol. 26(1). Pp. 73–86. (**Scopus, категорія А**). (авторський внесок – обробка результатів експериментальних досліджень, формулювання висновків).
33. **Gomon P.**, Gomon S., Pavluk A., Homon S., Chapiuk O., Melnyk Y. Innovative method for calculating deflections of wooden beams based on the Moment-Curvature Graph. *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 48. Pp. 195–200. (**Scopus**). (авторський внесок – розробка методичного підходу розрахунків прогинів, формулювання висновків).
34. Sobczak-Piastka J., Pavluk A., Gomon S. S., **Gomon P.**, Homon S., Lynnyk I. Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2928. Article number 080007. (**Scopus**). (авторський внесок – формулювання мети та задач, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів).
35. Mykhailovskyi D., **Gomon P.**, Mudryu I., Pakholiuk O., Karbovskiy V., Shevchuk P., Hlushenko O., Oksentiuk A. Stress-deformed state of compressed-bent and stretched-bent wooden elements. *Procedia Structural Integrity*. 2025. Vol. 72. Pp. 315–322 (**Scopus**). (авторський внесок – розробка методичного підходу до розрахунків, формулювання висновків).
36. Pavluk A., Gomon S., Zatiuk Y., **Gomon P.**, Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*. 2023. Vol. 65(2). Pp. 109–121. (**Scopus**). (авторський внесок – розробка загальної методики експериментальних досліджень, формулювання висновків).

#### **Патенти:**

37. Спосіб напруження зовнішньої стрічкової арматури балок з клеєної деревини: пат. № 143340 Україна: МПК E04C 3/26 (2006.01); заявник і патентовласник НУВГП – u2020 00431; заявл. 27.01.2020; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14 / Гомон С. С., **Гомон П. С.**, Поліщук М. В. (*авторський внесок – розробка технологічного процесу створення попереднього напруження в дерев'яній балці з комбінованим армуванням*).

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

38. **Гомон П. С.** До алгоритму побудови діаграми «момент-кривина» підсилених згинальних дерев'яних елементів. *The 2nd International scientific and practical conference : topical issues of modern science, society and education. September 5–7, 2021. SPC – Sci-conf.com.ua, Kharkiv, Ukraine, 2021. Pp. 156–157.*
39. Михайловський Д. В., Комар М. А., **Гомон П. С.** Моделювання деформування армованих дерев'яних балок за допомогою МСЕ. *Інновації у будівництві : збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених, 15 травня 2025 р., м. Луцьк : ЛНТУ, 2025. С. 40–42. (авторський внесок – проведення числових досліджень, обробка та аналіз результатів).*
40. Sobczak-Piąstka J., Polishchuk M., Gomon S.S., Karavan B., Homon S., **Gomon P.** Method of experimental research of new construction of beams from glued wood with combined reinforcement. 6<sup>th</sup> WMCAUS 2021. World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture. Urban Planning Symposium. 31 August – 3 September, 2021. Prague (Czech Republic), 2021. Pp. 356. (*авторський внесок – обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень, формулювання висновків*).
41. Михайловський Д. В., **Гомон П. С.** Особливості моделювання армування дерев'яної балки за допомогою плоских скінченних елементів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини : зб. тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції 12–14 червня 2025 р., м. Одеса : ОДАБА, 2025. С. 48–49 (авторський внесок – проведення числових досліджень, обробка та аналіз результатів).*
42. **Гомон П. С.** Ефективна клеєна дерев'яна балка з комбінованим армуванням. *Інновації у будівництві : зб. тез доповідей VII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, 12 травня 2022 р., м. Луцьк [Електронний ресурс]. Луцьк : ЛНТУ, 2022. С. 13–15.*
43. Sobczak-Piąstka J., Pavluk A., Gomon S. S., **Gomon P.**, Lynnyk I. Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. 7<sup>th</sup> WMCAUS. World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning – Symposium, Prague (Czech Republic), 5–9 September, 2022. Pp. 87. (*авторський внесок – розробка методики досліджень, формулювання висновків*).
44. **Гомон П. С.** Особливості проектування та розрахунку згинальних дерев'яних елементів з урахуванням нелінійності деформування. *Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій : матеріали XXIII міжнародного науково-практичного форуму, 4–6 жовтня 2022 року, м. Дубляни. Львів : ЛНУП, 2022. С. 541–542.*

45. **Гомон П. С.** Особливості визначення дотичних напруг в згинальному дерев'яному елементі з врахуванням нелінійності деформування. *Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи* : матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених, 21–22 жовтня 2022 р., м. Луцьк. Луцьк : IBV ЛНТУ, 2022. С. 140.
46. Janiak T., Homon S., Karavan V., **Gomon P.**, Gomon S.S., Kulakovskiy L., Famulyak Y. Mechanical properties of solid deciduous species wood at different moisture content. *Applied mechanics* : 11 International Scientific Session. Book of abstracts. Bydgoszcz. 2022. P. 20. (авторський внесок – розробка методики досліджень, формулювання висновків).
47. **Gomon P.**, Homon S., Pavluk A., Gomon S., Chapyuk O., Melnyk Y. Innovative method of determining deflections of wooden beams on the basis of “Moment-Curvature” diagram. *2nd International Symposium on Risk Analysis and Safety of Complex Structures and Components (IRAS 2023)*, April 2–4, 2023, Belgrade, Serbia. P. 72. (авторський внесок – розробка методичного підходу для визначення прогину згинальних дерев'яних елементів, формулювання висновків).
48. **Гомон П. С.** Моделювання роботи підсиленого попередньо напруженого згинального дерев'яного елементу. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини* : Міжнародна науково-технічна конференція 9–10 червня 2023. Одеса, 2023. С. 22–24.
49. **Gomon P.**, Gomon S., Homon S., Karavan B., Drobyshynets S., Sunak P., Chapiuk O., Chornomaz N. Determining the deflection due to shear stresses taking into account the nonlinearity of the materials of reinforced wooden beams. *Applied Mechanics* : 12/24 International Scientific Session. Bydgoszcz, Poland. November, 2024. P. 18. (авторський внесок – розробка методичного підходу для визначення прогину згинальних дерев'яних елементів, формулювання висновків).
50. **Gomon P.**, Drobyshynets S., Smal M., Dziubynska O., Uzhegova O., Golyk Y., Kaynts D., Kutsyna I. Design of reinforced plywood panels using deformation methods. *12th Annual conference of Society for Structural Integrity and Life (DIVK12)*. November 17–19, 2024, Belgrade, Serbia. P. 49. (авторський внесок – розробка методичного підходу для розрахунку клеєфанерної панелі, формулювання висновків).

#### **В інших виданнях**

51. **Гомон П. С.**, Бичковський Т.А. Визначення прогину залізобетонної балки з використанням діаграм деформування бетону та арматури. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2013. Вип. 27. С. 56–61. (авторський внесок – розробка методичного підходу для визначення прогину залізобетонних балок, формулювання висновків).

#### **АНОТАЦІЯ**

**Гомон П. С.** Методологічні засади моделювання та розрахунку елементів із цільної та клеєної деревини з комбінованим армуванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

**Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди). Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2026.**

Дисертаційна робота вирішує важливу науково-технічну проблему з підвищення жорсткості елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином шляхом використання різних армуючих матеріалів та їх моделювання. А також проблему розрахунку шляхом врахування сучасних теорій про міцнісні та деформаційні характеристики матеріалів, що, в свою чергу, дозволяє підвищити ефективність використання згинальних дерев'яних елементів та розширити сферу їх застосування.

Запропоновано комплекс методик моделювання роботи елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з комбінованим армуванням, під час їх попереднього напруження та експлуатації. Проведено детальний аналіз роботи попередньо напружених елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин та стиск зі згином з комбінованим армуванням та без армування, з попереднім напруженням та без. Вперше проведено попереднє напруження елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин армованих комбінованим армуванням та виконане їх випробування. Шляхом аналізу отриманих експериментальних даних досліджень елементів з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин з комбінованим армуванням було встановлено вплив пасивного та попередньо напруженого армування. Проведена верифікація методик моделювання роботи армованих дерев'яних конструкцій на основі статистичного порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними. Проведено статистичний аналіз збіжності експериментальних та теоретичних даних з методиками деформаційного моделювання та ПК ЛІРА САПР.

Робота має практичну цінність для проєктувальників та науковців, які займаються проєктування конструкцій з деревини.

**Ключові слова:** деревина, згинальний елемент, клеєна деревина, пасивне комбіноване армування, попередньо напружене комбіноване армування, жорсткість, діаграма «момент-кривина», деформаційна методика, несуча здатність.

## SUMMARY

**Gomon P. S. Methodological principles of modeling and structural analysis of solid and glued timber elements with combined reinforcement. – Qualifying scientific work.**

**Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in Specialty 192 – Construction and Civil Engineering (05.23.01 – Building Structures, Buildings and Facilities). Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, 2026.**

The dissertation substantiates the prerequisites for modeling and forecasting work, and develops a deformation method for calculating the stress-strain state of a normal section, bearing capacity, stiffness of reinforced and unreinforced elements made of solid and glued wood for direct transverse bending under the action of a single load. The deformation technique is based on: hypotheses and assumptions that use full deformation

diagrams of wood, reinforcing steel, composite reinforcement (fiberglass, basalt, carbon) and four stages of the stress-strain state of bending wooden elements under load.

The introduction substantiates the relevance, purpose and tasks of research, general characteristics and scientific novelty and practical value of the work.

In the first chapter of the dissertation, an overview and analysis of the current state of research on the operation of bending elements made of solid and glued wood reinforced with steel and composite reinforcement is carried out. On the basis of the conducted analysis, the direction of scientific research of the dissertation and the ways of solving the set problems were determined.

The second chapter is devoted to the justification of the proposed working hypotheses and the prerequisites for modeling the load-bearing capacity of a normal cross-section, predicting the ultimate load-bearing capacity, the stiffness of reinforced and unreinforced elements working for bending from solid and glued wood. The chapter considers the mechanism of wood deformation in the cross-section and the compatibility of the work of different materials from the beginning of the application of loads to destruction. A method of determining the stress-deformation state of cross-sections of wood elements during bending has been developed on the basis of determining the internal forces of the element from curvature, that is, according to the "moment-curvature" diagram. The possibility of transforming "moment-curvature" diagrams into diagrams of the mechanical state of unreinforced, passively reinforced and pre-stressed reinforced elements made of wood for the cross-sections of the element is substantiated. Calculation devices for determining the bearing capacity of bending wooden elements without reinforcement, passively reinforced and prestressed on the basis of "moment-curvature" diagrams have been developed.

In the third chapter, the main approaches to the modeling technique are shown and the simulation of passively reinforced bending wooden elements is carried out. The selection of the optimal variant of passive homogeneous and combined reinforcement of bending wooden elements to increase the load-bearing capacity according to the first group of limit states was carried out. Recommendations have been developed for strengthening bending wooden elements with passive combined reinforcement to obtain the best effect of increasing the load-bearing capacity according to the second group of limit states. A methodology for predicting the operation of a bending wooden element with combined reinforcement during prestressing of composite reinforcement has been developed. The calculation of the maximum possible prestressing of composite reinforcement in bending wooden elements was carried out. The stages of the stress-strain state after gluing the reinforcing material at different stages of the work of the pre-stressed bending wooden element are shown. Alternative methods of prestressing wooden bending elements are considered:

- with the initial tension of the compressed zone;
- with simultaneous gluing of reinforcing elements;
- with the initial stress of the reinforced element in the stretched zone.

The advantages and disadvantages of each of them are analyzed.

The fourth chapter is devoted to the program and methodology of experimental research. The dimensions of wooden prism samples during tests to determine the physical and mechanical characteristics of the material are shown and substantiated. It is described in detail how experimental beams were made from solid and glued wood. Much attention

is paid to the process of manufacturing test samples from glued wood with passive combined reinforcement. These elements were reinforced with steel reinforcement in the compressed zone and Sika CarboDur S-512 composite carbon tape in the stretched zone. The simplest methods of creating prestressing using carbon tape are considered and a new technological process of manufacturing prestressed wooden elements is proposed. The power equipment, measuring devices used in experimental studies and their placement schemes, are described. The process of testing experimental samples of beams made of solid and glued wood with passive and prestressed reinforcement is described. The volume of experimental tests is established.

The fifth chapter presents the results of theoretical modeling and experimental studies of solid wood elements with combined reinforcement with prestressing and without prestressing, which work in bending. A comparison of theoretical and experimental data was made. The stress-strain state of the beams during prestressing in the Sika CarboDur S-512 carbon tape and during the test taking into account the operation of the reinforcement in the compressed zone after prestressing was analyzed. Carbon tape has been found to be effective for use in timber beams as a prestressing member, while it should be used in combination with steel reinforcement. An adhesive joint of Sikadur-30 composite adhesive has been proven to create excellent interoperability between wood and Sika CarboDur S-512 carbon tape. The obtained experimental data "moment - curvature" and "moment - deflection" differ from the theoretically modeled data within  $\pm 10\%$ .

The sixth chapter is devoted to the verification of the results of modeling the "moment – curvature" and "moment – deflection" diagrams with the data obtained by testing experimental beams made of glued wood. The verification was carried out for beams without prestressing and with prestressing, with and without combined reinforcement. An analysis of the convergence of the theoretical values of modeling the work of glued timber beams with the known experimental data of other authors was carried out. It was established that passive reinforcement and reinforcement with prestressing always increases the load-bearing capacity of beams, both for normal cross-sections and for the second group of limit states. It was established that, in order to increase the load-bearing capacity of combined reinforced bending wooden elements made of solid and glued wood, additional reinforcement is needed to counteract tangential forces.

**Keywords:** wood, bending element, glued wood, passive combined reinforcement, prestressed combined reinforcement, stiffness, moment-curvature diagram, deformation method, strength.

Підписано до друку 07.04.2026 р. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Ум.-друк. арк. 2,0. Тираж 100 прим.  
Зам. № 5684.

---

*Видавець і виготовлювач  
Національний університет  
водного господарства та природокористування,  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного  
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*