

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ПАВЛЮК АНДРІЙ ПАВЛОВИЧ

УДК 624. 011.14

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ З КЛЕСНОЇ  
ДЕРЕВИНИ В УМОВАХ КОСОГО ЗГИНУ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Рівне – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті водного господарства та природокористування (м. Рівне) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Гомон Святослав Степанович,**  
Національний університет водного господарства та природокористування, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд;

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Семко Олександр Володимирович,**  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва.

кандидат технічних наук, доцент  
**Михайловський Денис Віталійович,**  
Київський національний університет будівництва і архітектури, доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій.

Захист відбудеться « 21 » травня 2019 р., о 11 год. 00 хв., на засіданні спеціалізованої вченої ради К 47.104.06 в Національному університеті водного господарства та природокористування за адресою: 33028, Рівне, вул. Чорновола, 49, ауд.673

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33028, Рівне, вул. Олекси Новака, 75.

Автореферат розіслано « 16 » квітня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради К 47.104.06  
кандидат технічних наук, доцент



О.М. Бордюженко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Деревина – природний будівельний матеріал, який завдяки своїй відновлюваності та наявності багатой сировинної бази в нашій країні має можливість більш широкого застосування в галузі будівництва. Досвід розвинених країн Європи показує широке використання конструкцій з цільної та клеєної деревини в якості несучих, а також огорожуючих елементів будівель.

Згин – один з найбільш розповсюджених видів напружено-деформованого стану будівельних конструкцій. Косий згин, який є його різновидом, спостерігається тоді, коли напрямок дії навантаження не збігається з жодною з головних осей поперечного перерізу, і виникає в балках, прогонах, обрешітці, в елементах покрівель та мостів, похилих естакадах тощо. Практика проектування дерев'яних конструкцій показує, що кількість елементів, які зазнають дії косоного згину, становить 18-22% від загальної кількості згинальних елементів. Крім цього, враховуючи анізотропію деревини, наявність дефектів та пошкоджень, різні сорти деревини в клеєних балках, можна зробити висновок, що дерев'яні згинальні елементи в тій чи іншій мірі зазнають впливу дії косоного згину.

Діючі норми не враховують особливостей роботи балок з клеєної деревини за косоного згину, зокрема, реальну зміну напружено-деформованого стану таких елементів за зміни навантаження від початку прикладання і до руйнування. На даний час робота деревини в конструкціях приймається умовно пружною, що не зовсім точно відповідає реальній роботі.

Дослідження процесу пошарового деформування по висоті перерізу та встановлення особливостей напружено-деформованого стану цих шарів за дії косоного згину дадуть змогу з більшою достовірністю проводити розрахунок клеєних дерев'яних балок на різних рівнях навантаження.

Дослідження питань міцності та надійності косозігнутих дерев'яних конструкцій є дуже актуальним, оскільки в приведених на даний час роботах практично відсутні дані про такий складний напружено-деформований стан.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, питаннями, темами.** В дисертації наведено вирішення завдань, які входять в плани кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування за темами «Дослідження роботи та удосконалення методів розрахунку будівельних конструкцій при різних режимах зовнішніх впливів» (номер державної реєстрації 0107U004181) та «Дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, удосконалення методики їх розрахунку та розробка пропозицій до нормативних документів» (номер державної реєстрації 0117U002816).

**Метою роботи** є розробка методики розрахунку елементів з клеєної деревини в умовах косоного згину з використанням деформаційної моделі на основі проведення комплексних експериментально-теоретичних досліджень зразків в натуральну величину.

### **Задачі досліджень:**

- розробити методику експериментальних досліджень зразків клейових швів та балок з цільної і клеєної деревини, які знаходяться в умовах косоного згину під

різними кутами нахилу за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень;

- провести експериментальні дослідження і отримати нові дані щодо напружено-деформованого стану за різних рівнів навантаження і режимів роботи, виконати їх аналіз та встановити особливості роботи зразків клейових швів і дерев'яних балок в умовах косоного згину за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень різних рівнів;

- визначити несучу здатність зразків клейових швів, косозігнутих дощатоклеєних і цільнодерев'яних балок, встановити характер їх руйнування;

- розробити методику розрахунку дерев'яних балок, які знаходяться в умовах косоного згину, з використанням деформаційної моделі на основі врахування дійсної роботи деревини стиснутої зони за дії одноразових навантажень;

- порівняти експериментальні дані випробувань з теоретичними розрахунками косозігнутих балок з використанням деформаційної моделі та методу скінчених елементів.

**Об'єкт дослідження** – косий згин балок з цільної та клеєної деревини.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан елементів з цільної та клеєної деревини, які знаходяться в умовах косоного згину за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень.

**Методи дослідження:**

- аналітичні дослідження існуючих даних про роботу конструкцій із цільної та клеєної деревини в умовах косоного згину на основі аналізу науково-технічної літератури;

- проведення теоретичних досліджень;

- експериментальні випробування клейових швів за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень;

- експериментальні випробування балок з цільної та клеєної деревини в умовах косоного згину за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- проведено експериментальні дослідження клейових швів за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень різних рівнів в результаті чого отримано нові експериментальні дані про їх міцність та побудовані діаграми деформування деревини зон, що прилягають до клейових швів на основі яких встановлено вплив різних режимів повторних навантажень на їх роботу;

- проведено експериментально-теоретичні дослідження балок з цільної деревини в умовах косоного згину за різних кутів нахилу та схем передачі навантаження, отримано нові експериментальні дані про конструктивну міцність деревини та несучу здатність балок, побудовані діаграми деформування волокон деревини в середині прольоту балок, які працюють за дії одноразових навантажень, що дало змогу встановити стадії напружено-деформованого стану балок від початку навантаження до руйнування та визначити оптимальну схему передачі навантаження;

- проведено експериментально-теоретичні дослідження балок з клеєної деревини в умовах косоного згину за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень, отримано нові експериментальні дані про напружено-деформований

стан по висоті поперечного перерізу в зоні чистого згину та несучу здатність балок, які дозволили віднести різні рівні навантаження відповідним стадіям напружено-деформованого стану, побудовані діаграми деформування волокон деревини та повних прогинів в середині прольоту балок, а також епюри напружень в стиснутій і розтягнутій зонах;

- встановлено вплив дії малоциклових повторних навантажень різних рівнів на подальшу роботу згинальних елементів з деревини за косоного згину, що дало можливість побудувати діаграми поциклової зміни максимальних відносних деформацій, трансформацій епюр напружень в стиснутій і розтягнутій зонах та повних прогинів балок за їх різних режимів роботи;

- вперше розроблено методику розрахунку дерев'яних балок в умовах косоного згину з використанням деформаційної моделі на основі більш повного врахування міцнісних і деформативних властивостей деревини в стиснутій зоні елемента за дії одноразових навантажень.

Достовірність та обґрунтованість результатів забезпечується необхідним обсягом експериментальних та теоретичних досліджень, обумовлених метою та задачами, проведенням випробувань на повірених та сертифікованих вимірювальних приладах в атестованій науково-дослідній лабораторії будівельних конструкцій і споруд кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП (свідоцтво про атестацію №РТ-0134/2015, видане 21 грудня 2015 року ДП «Рівненський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»), порівнянням отриманих експериментальних даних з власними теоретичними дослідженнями та результатами роботи інших науковців.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні конструкцій з цільної та клеєної деревини будівель і споруд різного призначення в умовах косоного згину, а також в навчальному процесі.

Результати дисертаційної роботи були застосовані при проектуванні дерев'яного мосту через р. Стир в с. Іваничі на території Зарічненської селищної ради Рівненської області. Зокрема, була визначена несуча здатність елементів пролітної будови з врахуванням впливу малоциклових навантажень. Результати проведених експериментальних досліджень також було використано при реконструкції дошкільного навчального закладу по вул. Шкільній, 4 в с. Переброди Дубровицького району Рівненської області. Зокрема, визначена несуча здатність дерев'яної обрешітки за допомогою деформаційної моделі.

Окремі результати досліджень використані в розробці робочих програм дисциплін «Конструкції з деревини і пластмас», «Прогресивні методи дослідження, проектування і застосування конструкцій з деревини і пластмас» спеціальності «Промислове і цивільне будівництво» в НУВГП.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати досліджень отримані самостійно. У працях з співавторами автором виконано:

- проведено експериментальні випробування балок з цільної деревини в умовах косоного згину за різних схем прикладання навантаження, встановлено величини відносних деформацій та прогинів в [1,2,4,9,14];

- проведено експериментальні дослідження дощатоклеєних балок в умовах косоного згину за дії одноразових та малоциклових повторних навантажень, визначено величини відносних деформацій, прогинів, напружень в [3, 5];
- розроблено методику досліджень балок з цільної та клеєної деревини в умовах косоного згину в [7];
- проведено аналіз роботи косозігнутих елементів з деревини в [8];
- проведено дослідження дощатоклеєних балок, визначено положення нейтральної лінії та встановлено величин модулів пружності балок за згину в [11];
- проведено розрахунки косозігнутих балок методом скінчених елементів в програмному комплексі «Ліра 9.6» та порівняно їх з експериментальними даними в [10, 12, 13];
- розроблено методику розрахунку косозігнутих балок за деформаційною моделлю в [6];
- проведено експериментальні дослідження клейових швів, встановлено вплив повторних малоциклових навантажень на зразки в [15];
- проведено аналіз та обробку результатів випробувань в [16].

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Результати отриманих досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях: Науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (м. Київ, 2-3 червня 2016 р.); II Міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих вчених та студентів «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, 20-22 жовтня 2016 р.); Международной конференции «Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития» (м. Могильов, 3-4 листопада 2016 р.); Третій міжнародній науково-практичній конференції «Підводні технології 2017» (м. Київ, 21-23 березня 2017 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції з міжнародною участю «Ресурсозберігаючі технології в проектуванні, землевпорядкуванні та будівництві» (м. Кременчук, 18-21 квітня 2017 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології і конструкції у будівництві та архітектурі села» (м. Дубляни, 26-28 квітня 2018 р.); Міжнародній конференції «Eastern Europe Conference of Timber Constructions» (м. Харків, 7-8 червня 2018 р.); Дев'ятій міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 16-18 жовтня 2018 р.), Міжнародній науковій конференції «Applied Mechanics» (м. Бидгощ, 23 листопада 2018 р.) та на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів та студентів НУВГП (м. Рівне, 2014...2018 р.р.).

**Публікації.** Результати отриманих досліджень опубліковані у 16 наукових працях, серед них 12 наукових публікації у фахових виданнях, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 1 тези в матеріалах конференції іншої держави.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, змісту, п'яти розділів, списку використаної літератури та додатків. Загальна кількість сторінок дисертації – 238, серед яких 150 сторінок основного тексту та 22 таблиці, 79 рисунків, 174 найменування літературних джерел і 13 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено актуальність обраної теми та її зв'язок з науковими програмами та темами. Поставлені мета та задачі дослідження, відповідно до яких виконана робота. Надана інформація щодо апробації результатів випробувань та особистий внесок автора в опублікованих працях за результатами отриманих досліджень.

У першому розділі наведена інформація про застосування деревини в сучасному будівництві громадських та житлових будинків. Проведено огляд та аналіз існуючих досліджень елементів з цільної та клеєної деревини за стиску, розтягу, згину та косоного згину. Зокрема, роботу на стиск вивчали Хухрянський П.Н., Панферов К.В., Леонт'єв Н.Л., Иванов Л.А., Тутурин С.В., Вареник К.А., Иванов Ю.М., Фурсов В.В., Квасников Е.Н. Дослідженням роботи дерев'яних елементів за розтягу займалися F. Kollman, M. Kuffner, Пригунков А.В., Сурмай М.І., Иванов Ю.М., Свеницкий Г.В., Найчук А.Я., Е.Еріксон, Б.П. Уголев, Лабудин Б.В. Згин елементів з цільної деревини досліджували та розробляли методи розрахунку Бойко М.Д., Белянкин Ф.П., Фурсов В.В., Хухрянський П.Н., Знаменский Е.М., Иванов С.П., Гурин О.В., Белянкин Ф.П., Квасников Е.Н., Волинський В.Н., Родин Б.Е. Елементи з клеєної деревини за згину вивчали такі вчені як Crocetti R., Faye C., Anshari B., Rammer D.R., Демчина Б.Г., Найчук А.Я., Михайловський Д.В., Фурсов В.В., Масалов А.В., Деловая М.И., Стоянов В.В., Муравльов В.В., Замицкий О.М., Королев В.І., R. Tuchi, J.Vogit, Васильев А.Ю., Антипов В.Д., Сурмай М.І., Сасовський Т.А., Гомон С.С., Ягнюк Б.Н. та інші. Дослідженням малоциклових повторних навантаження дощатоклеєних балок займалися Иванов С.П., Сасовський Т.А., Сморгчов А.А., Гомон С.С. Косий згин металевих та залізобетонних конструкцій вивчений в достатній мірі та представлений в роботах Семка О.В., Павлікова А.М., Кочкар'єва Д.В., Ромашка В.М., Василенка Б.В., Бойка О.В., Зернюка О.В., Федорова Д.В. та інших. На основі проведеного аналізу існуючих досліджень елементів з цільної та клеєної деревини було зроблено висновки, що косий згин, як один з різновидів згину, на сьогоднішній день вивчений недостатньо та обмежений загально прийнятими правилами опору матеріалів. Крім цього, діючі норми дозволяють провести розрахунок міцності косозігнутих балок лише в пружній стадії роботи, тоді як реальна робота деревини є пружно-пластичною. Враховуючи дані факти, а також відповідно до проведеного аналізу існуючих досліджень косоного згину елементів з цільної та клеєної деревини, сформульовані основні задачі дослідження.

У розділі 2 наведена методика виготовлення дослідних зразків та дослідження балок з цільної та клеєної деревини за косоного згину, а також зразків клейових швів. Попередній аналіз роботи дерев'яних балок за косоного згину був проведений на моделях цільнодерев'яних балок. Для зразків було розроблено три схеми передачі навантаження з метою визначення оптимальної, які характеризувались меншими деформаціями і більшою несучою здатністю. Відповідно до даних схем балки з цільної деревини були умовно поділені на три групи. Зразки виготовлялись з деревини першого сорту. Випробування проводилось за кутів нахилу  $10^\circ$  та  $25^\circ$ . Розрахункова схема випробування за косоного згину прийнята у вигляді шарнірно опертої балки на двох опорах,

завантаженої двома зосередженими силами в третинах прольоту. Експериментальні зразки опиралися на металеві пластини, які забезпечували необхідний кут нахилу.

Для фіксування прогинів балок в двох площинах встановлювались прогиноміри 6-ПАО на опорах та в середині прольоту. Вимірювання відносних деформацій балок виконувалось за допомогою тензодатчиків базою 50 мм, які приклеювались в середині прольоту по периметру поперечного перерізу, та тензометричної системи СІИТ-3. Навантаження прикладалось ступенями з витримкою на кожному рівні навантаження для вимірювання всіх деформацій.

Після проведення випробувань балок було визначено оптимальну схему. Нею виявилась третя схема з влаштуваннями в'язей в місцях прикладання навантаження та на опорах, так як їх несуча здатність більша в порівнянні з балками інших груп, а деформативність - менша.

Враховуючи результати випробувань балок з цільної деревини, було проведено дослідження дощатоклеєних балок за дії одноразових навантажень відповідно до оптимальної схеми. Балки склеювались резорциновим клеєм. Поперечний переріз виготовлених зразків становив 100×150 мм довжиною 3,0 м. Розрахунковий проліт складав 2,7 м. За аналогічною схемою розташування приладів проводилось випробування балок з клеєної деревини за дії повторних малоциклових навантажень різних рівнів. Загальний вигляд дослідної установки, а також схема розташування вимірювальних приладів на дощатоклеєних балках наведено на рис. 1.

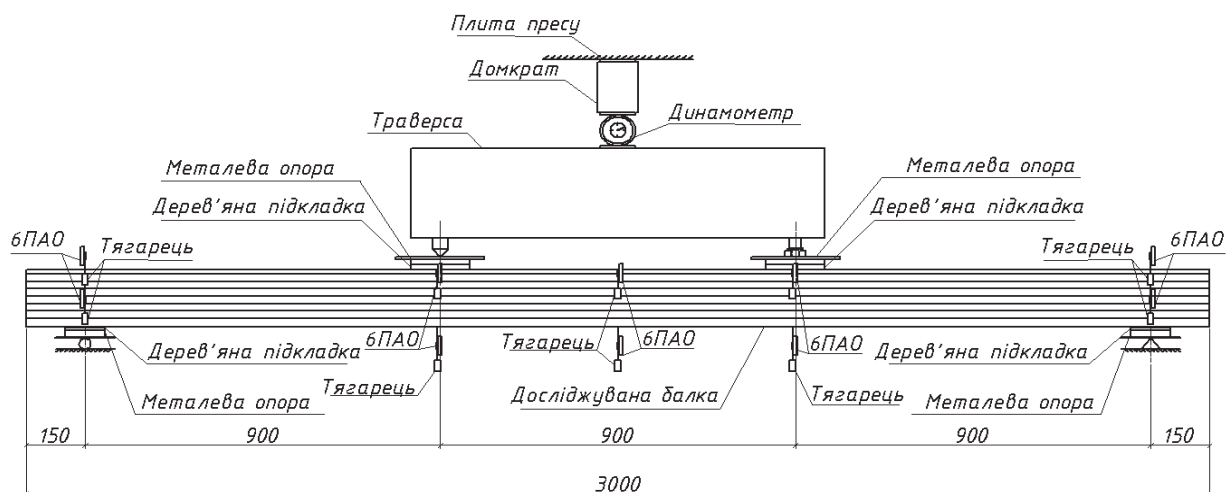


Рис. 1 – Схема дослідної установки випробувань дощатоклеєних балок

У розділі 3 наведено результати досліджень міцності клейових швів за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень. Середнє значення межі міцності клейового шва за дії одноразового навантаження становило 6,14 МПа, що більше мінімальних значень наведених в нормативній документації. Отже, обраний резорциновий клей в повній мірі забезпечує монолітність з'єднання дощок у виготовлених дощатоклеєних балках.

Діапазон режимів повторних навантажень становив від  $\eta = (0,2 - 0,4) F_{ск}$  до  $\eta = (0,2 - 0,9) F_{ск}$ . Встановлено, що до режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,6) F_{ск}$  прирости



відносних деформацій були практично відсутні, стабілізація яких відбувалась до 15 циклу. Руйнівні навантаження після прикладання розрахункового числа повторних навантажень не зменшувались. За режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,7)F_{ck}$  спостерігалось незначне збільшення відносних деформацій протягом малоциклових випробувань. За режимів  $\eta = (0,2 - 0,8)F_{ck}$  та  $\eta = (0,2 - 0,9)F_{ck}$  відносні деформації зразків стрімко зростали з наступним їх руйнуванням (до 20 циклу).

У 4 розділі наведено результати досліджень балок з цільної деревини в умовах косоного згину за різних кутів нахилу –  $10^\circ$  та  $25^\circ$ . Встановлено їх несучу здатність за першою та другою групою гарничних станів. Визначено зміну положення нейтральної лінії протягом збільшення навантаження – від початку його прикладання і до руйнування. Встановлено, що площа стиснутої зони косозігнутих балок протягом зростання навантаження збільшує свою площу, а розтягнута зона – відповідно зменшує. Визначено величини відносних деформацій балок з цільної деревини за різних схем прикладання навантаження. Проведено розрахунок балок відповідно до визначеної оптимальної схеми методом скінчених елементів та виконано порівняння отриманих даних з експериментальними, а також теоретичними. Граничні значення моментів балок з цільної деревини, які працюють в умовах косоного згину, визначені теоретичним шляхом за допомогою формул опору матеріалів та методу скінчених елементів вказують на запас несучої здатності за другою групою граничних станів в порівнянні з експериментальними даними.

Випробування дощатоклеєних балок БДК-1...БДК-4 проводились за дії одноразових навантажень (БДК-1, БДК-2 за кута нахилу  $10^\circ$ , БДК-3 та БДК-4 за кута нахилу  $25^\circ$ ). Встановлено характер їх руйнування (рис. 2).



Рис. 2 – Характер руйнування дощатоклеєної балки БДК-2 після дії одноразових навантажень

Руйнування косозігнутих балок розпочиналося з утворення складки в стиснутій зоні чистого згину. Після чого відбувалося руйнування крайньої дошки розтягнутої зони з наступним поширенням тріщини на верхні шари балки. Руйнівний момент балки БДК-1 становив 17,1 кНм, балки БДК-2 – 17,28 кНм. По мірі віддалення тензодатчиків від нейтральної лінії спостерігалось збільшення відносних деформацій відповідних шарів деревини. Діаграма деформування балки БДК-1 наведена на рис.3. Руйнівні моменти дощатоклеєних балок БДК-3 та БДК-4

становили 17,55 кНм та 17,82 кНм відповідно. Експериментальні зразки випробовувались за кута нахилу  $25^\circ$ .

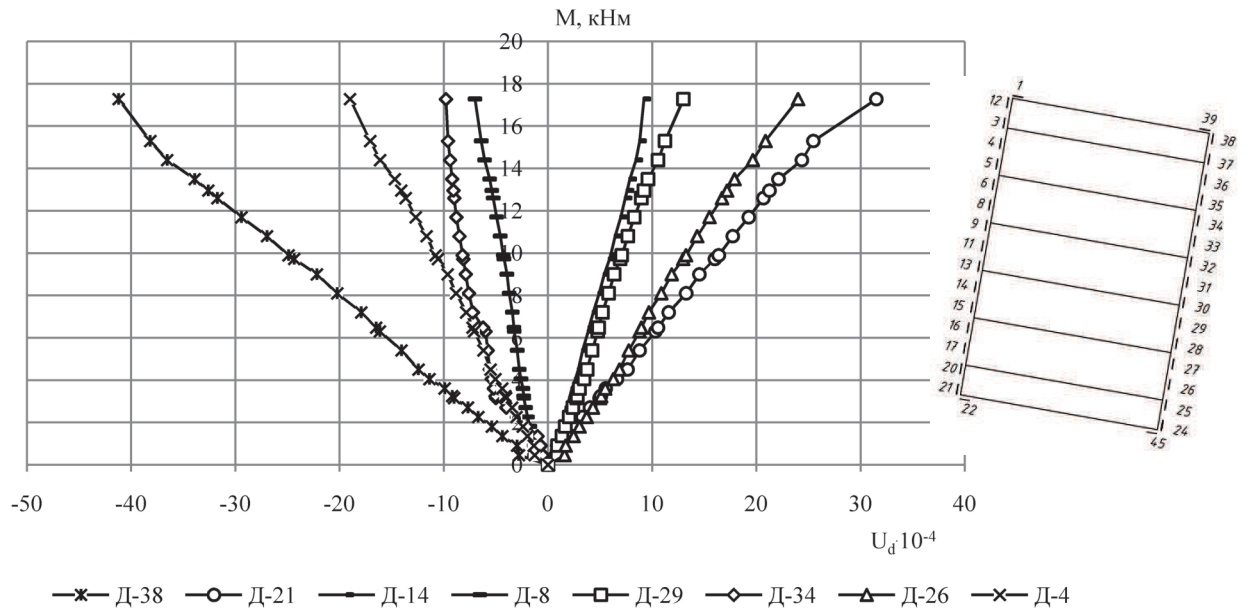


Рис. 3 – Діаграма деформування різних шарів деревини в зоні чистого згину балки БДК-1

Для порівняння експериментальних значень прогинів з теоретичними (визначені за правилами опору матеріалів) та визначених методом скінчених елементів будувались графіки залежності (рис. 4). Граничні значення моментів косозігнутих балок з клеєної деревини, що досягаються в точці граничного прогину, які визначені теоретичним шляхом та за допомогою методу скінчених елементів також вказують на запас несучої здатності за другою групою граничних станів в порівнянні з експериментальними. Аналогічна ситуація спостерігалася і за кута нахилу  $25^\circ$ .

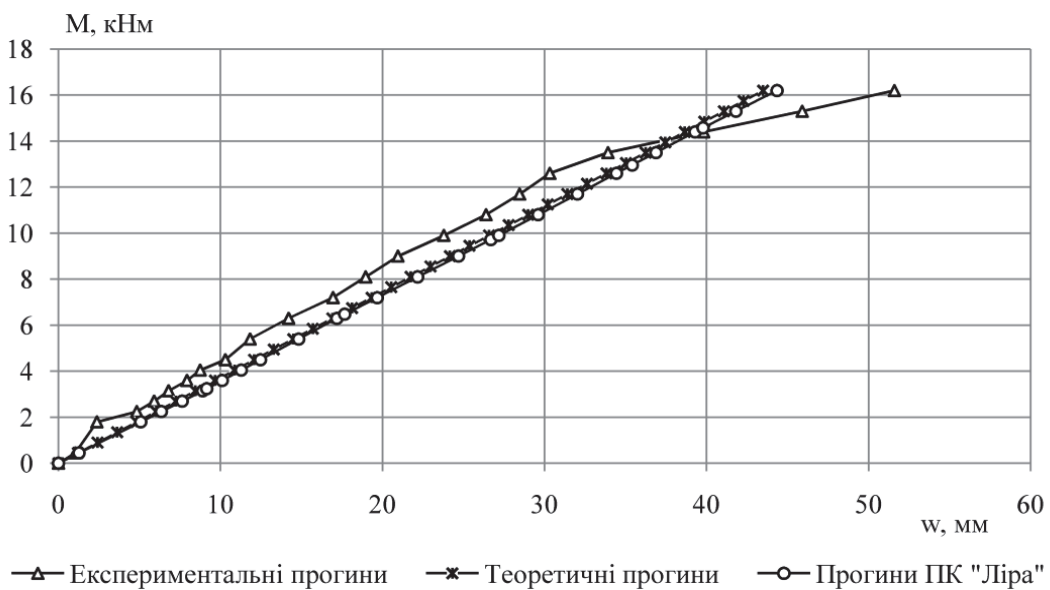


Рис. 4 – Повні прогини дощатоклеєної балки за кута нахилу  $10^\circ$

На основі визначення несучої здатності дощатоклеєних балок в умовах косоного згину за дії одноразового навантаження, було складено режими роботи наступних дослідних зразків, які випробовувались за дії малоциклових повторних навантажень. Балка БДК-5 випробовувалась за режиму  $\eta = (0,2 - 0,4)M_{\max}$  та  $\eta = (0,2 - 0,6)M_{\max}$  (рис.5), балка БДК-6 за режиму  $\eta = (0,2 - 0,8)M_{\max}$ , БДК-7 за режиму  $\eta = (0,2 - 0,9)M_{\max}$ . Кут нахилу даних балок становив  $10^\circ$ .

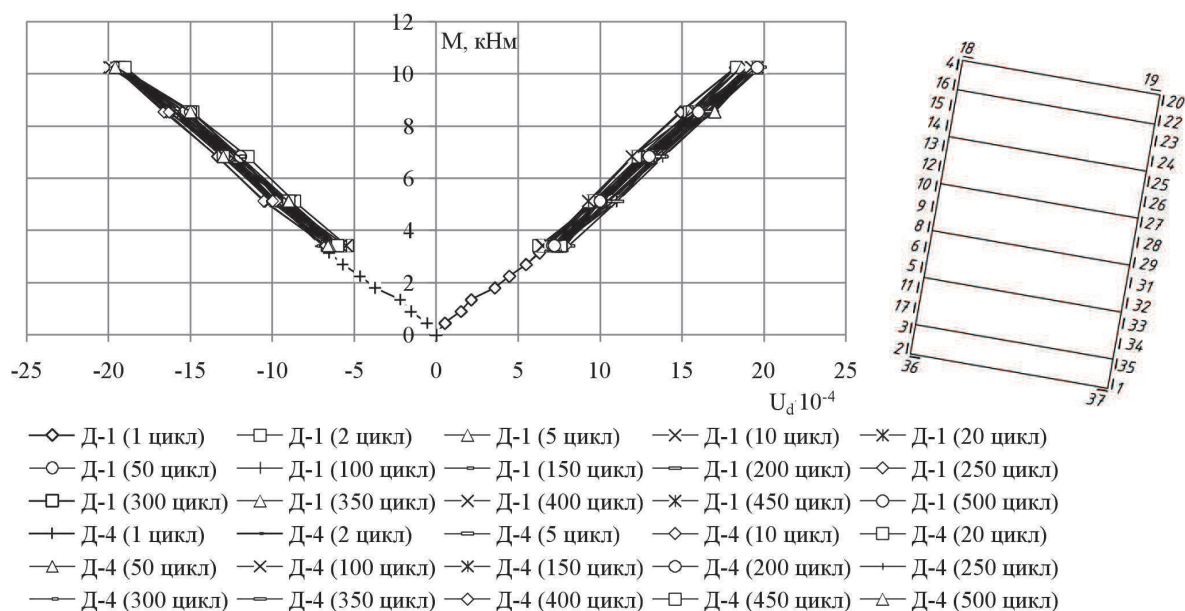


Рис. 5 – Діаграма деформування найбільш віддалених шарів деревини балки БДК-5 за режиму роботи  $(0,2-0,6) M_{\max}$

Випробування за кута нахилу  $25^\circ$  проводилось для балок БДК-8 (режим роботи  $\eta = (0,2 - 0,4)M_{\max}$ ) та БДК-9 (режим роботи  $\eta = (0,2 - 0,6)M_{\max}$ ). Рівень навантаження  $0,2M_{\max}$  відповідає постійному навантаженню (власна вага конструкцій), тоді як рівням  $0,6M_{\max}$ ,  $0,8M_{\max}$ ,  $0,9M_{\max}$  відповідають змінні навантаження (навантаження під час ремонтів та реконструкцій будівель і споруд, вага обладнання в період пуско-налагоджувальних робіт, сейсмічні та вибухові впливи, снігове навантаження тощо).

Деформації крайніх волокон стиснутої та розтягнутої зони балки БДК-5 за режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,4)M_{\max}$  зростали до 20 циклу, після чого спостерігалась їх стабілізація. В свою чергу, прирости відносних деформацій проходили стабілізацію до 5 циклу випробувань, що говорить про пристосування дощатоклеєної балки до даного режиму роботи. Враховуючи незначний рівень навантажень, відсутність значного приросту, як прогинів, так і відносних деформацій, а також пристосування балки до режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,4)M_{\max}$ , подальше випробування балки БДК-5 проводилось за режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,6)M_{\max}$ . Виражений ріст відносних деформацій стиснутої зони балки БДК-5 за даного режиму роботи проходив до 150 циклу, розтягнутої – до 100, після якого вони стабілізувались. Стабілізація приростів відносних деформацій в

стиснутій та розтягнутій зонах за режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,6)M_{\max}$  проходила до 12 циклу випробувань, що говорить про пристосування дощатоклеєної балки до даного режиму роботи. Після 500 циклів випробувань балка повністю розвантажувалась і доводилась до руйнування поступовим одноразовим навантаженням.

Впродовж всіх циклів випробувань балки БДК-7 за режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,9)M_{\max}$  відбувався незначний ріст деформацій. Проте, так як на верхньому рівні навантаження  $0,9M_{\max}$  зафіксовані високі величини відносних деформацій стиснутої та розтягнутої зони, їх незначний ріст призвів до руйнування балки БДК-7 на 103 циклі випробувань.

Стабілізація приростів відносних деформацій балки БДК-8 за режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,4)M_{\max}$  в стиснутій та розтягнутій зонах деревини проходила до 5 циклу, що говорить про пристосування балки до режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,4)M_{\max}$  за кута нахилу  $25^\circ$ . У зв'язку з відсутністю значних приростів деформацій та пристосуванням до даного режиму роботи було прийнято рішення повністю розвантажити дощатоклеєну балку з наступним доведенням її до руйнування поступовим навантаженням.

Стабілізація приростів відносних деформацій балки БДК-9 за режиму роботи  $\eta = (0,2 - 0,6)M_{\max}$  та кута нахилу  $25^\circ$  в стиснутій і розтягнутих зонах проходила до 20 циклу, що свідчить про пристосування балки до даного режиму роботи (рис. 6). У зв'язку з цим було прийнято рішення повністю розвантажити дослідну дощатоклеєну балку з наступним доведенням її до руйнування поступовим навантаженням.

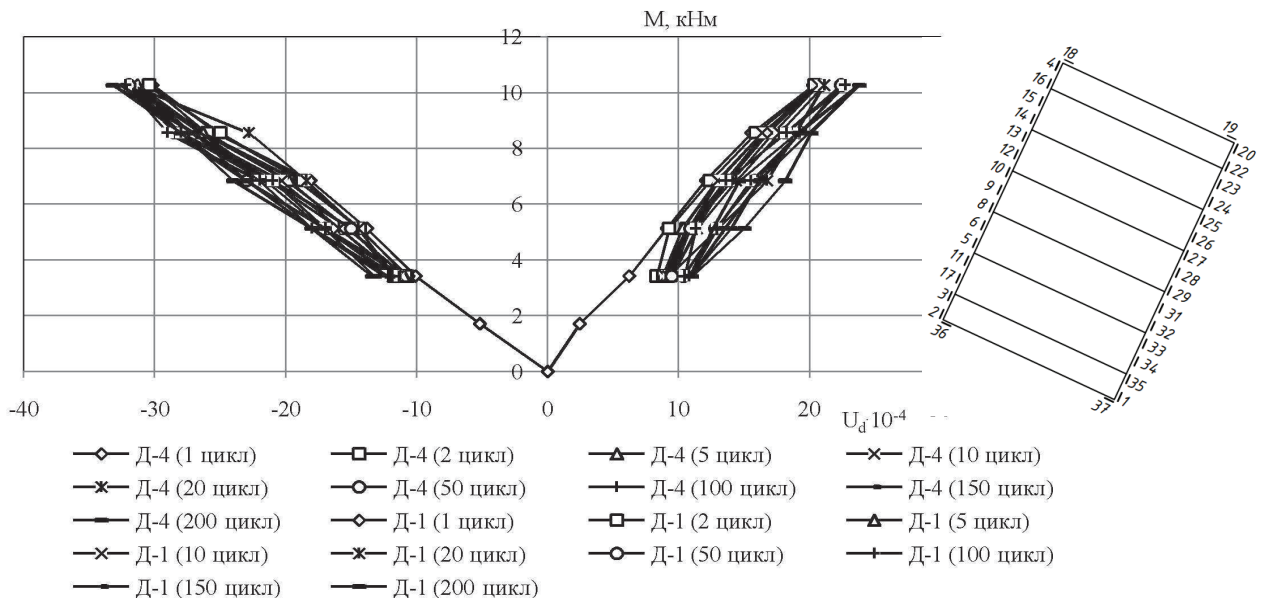


Рис. 6 – Діаграма деформування найбільш віддалених шарів деревини балки БДК-9 за режиму роботи  $(0,2-0,6) M_{\max}$

Повний прогин дощатоклеєних балок при режимі роботи  $\eta=(0,2-0,4)M_{\max}$  за кута нахилу  $10^\circ$  зростав протягом перших десяти циклів випробувань, приріст становив 2,44 %. Після 10 циклу відбулась стабілізація приростів, протягом

наступних 20 циклів вони становили 1,77 % з максимальним значенням прогинів  $w_{\text{цик},30}^{\text{max}} = 16,18 \text{ мм}$ . При режимі роботи  $\eta = (0,2-0,6)M_{\text{max}}$  за кута нахилу  $10^\circ$  приріст прогинів відбувався до десятого циклу (3,58%). На наступних 490 циклах випробувань приріст становив лише 3,11% з максимальним значенням повного прогину  $w_{\text{цик},500}^{\text{max}} = 26,83 \text{ мм}$ . За кута нахилу  $25^\circ$  та аналогічного режиму роботи стабілізація пройшла після 50 циклу, прирости повних прогинів були дещо більшими і складала: від першого до десятого циклу – 24,73 %; від десятого до двадцятого – 9,21 %; від двадцятого до п'ятдесятого – 11,1%; від п'ятдесятого до сотого – 1,46 %; від сотого до двохсотого – 2,74%. Максимальне значення повного прогину за 200 циклів становило  $w_{\text{цик},200}^{\text{max}} = 35,58 \text{ мм}$ . При режимі роботи  $\eta = (0,2-0,8)M_{\text{max}}$  за кута нахилу  $10^\circ$  прирости деформацій відбувались протягом всіх циклів випробувань, проте вони були незначними. Від 1 до 250 циклу приріст повних прогинів становив лише 2,23% з максимальним значенням  $w_{\text{цик},250}^{\text{max}} = 34,90 \text{ мм}$ . При режимі роботи  $\eta = (0,2-0,9)M_{\text{max}}$  за кута нахилу  $10^\circ$  прирости відбувались протягом всіх циклів випробувань аж до руйнування на 103 циклі.

У 5 розділі наведено розрахунок напружень балок з цільної та клеєної деревини в умовах косоного згину. Напруження в нормальному перерізі дерев'яних балок обчислювались на основі даних відносних деформацій в зоні чистого згину за двома функціями

$$f_1(u) = \sigma_{t,d} = E \cdot u_{t,d}; \quad (1)$$

$$f_2(u) = \sigma_{c,d} = k_1 \cdot u_{c,d} + k_2 \cdot u_{c,d}^2 \quad (2)$$

Перша функція описує напруження в розтягнутій зоні дерев'яної балки (прямолінійна), друга функція – напруження в стиснутій зоні (криволінійна). Використовуючи формули 1 та 2, було знайдено величини напружень в поперечному перерізі балок у середині їх прольоту. Для балки БДК-1 за рівня навантаження  $M=0,2M_{\text{max}}$  максимальні напруження стиснутої зони становили  $\sigma_{c,d,\text{max}} = 20,20 \text{ МПа}$  (рис. 7), характер епюри напружень в стиснутій зоні носив практично прямолінійний характер. Тому можна стверджувати, що балка працює в II стадії напружено-деформованого стану. За рівня навантаження  $M=0,4M_{\text{max}}$  та  $M=0,6M_{\text{max}}$  спостерігалось збільшення максимальних значень напружень стиснутої зони до  $\sigma_{c,d,\text{max}} = 33,64 \text{ МПа}$  та  $\sigma_{c,d,\text{max}} = 40,42 \text{ МПа}$  відповідно. Характер епюри напружень за даних рівнів навантажень набуває криволінійного характеру. Враховуючи вище наведене, можна зробити висновок, що за даних рівнів навантажень дощатоклеєна балка працює в II стадії напружено-деформованого стану. За рівня навантаження  $M=0,8M_{\text{max}}$  максимальна величина напружень  $\sigma_{c,d,\text{max}} = 49,20 \text{ МПа}$  зафіксована на висоті 140 мм. Величина напружень стиснутої зони в найбільш віддаленому шарі перерізу балки була дещо меншою і становила  $\sigma_{c,d,\text{max}} = 48,10 \text{ МПа}$ . Величини даних напружень та характер епюри напружень говорять про утворення складки в балці БДК-1, а отже, її роботу в III стадії напружено – деформованого стану. Характер епюри напружень в розтягнутій зоні на всіх рівнях навантажень мав прямолінійний характер. Максимальні напруження спостерігались в максимально віддалених шарах деревини від

нейтральної лінії та становили: за рівня навантаження  $M=0,2M_{\max}$  –  $\sigma_{t,d,\max} = 24,82 \text{ МПа}$ , за рівня  $M=0,4M_{\max}$  –  $\sigma_{t,d,\max} = 37,00 \text{ МПа}$ , за рівня  $M=0,6M_{\max}$  –  $\sigma_{t,d,\max} = 56,20 \text{ МПа}$ , за рівня  $M=0,8M_{\max}$  –  $\sigma_{t,d,\max} = 74,83 \text{ МПа}$ .

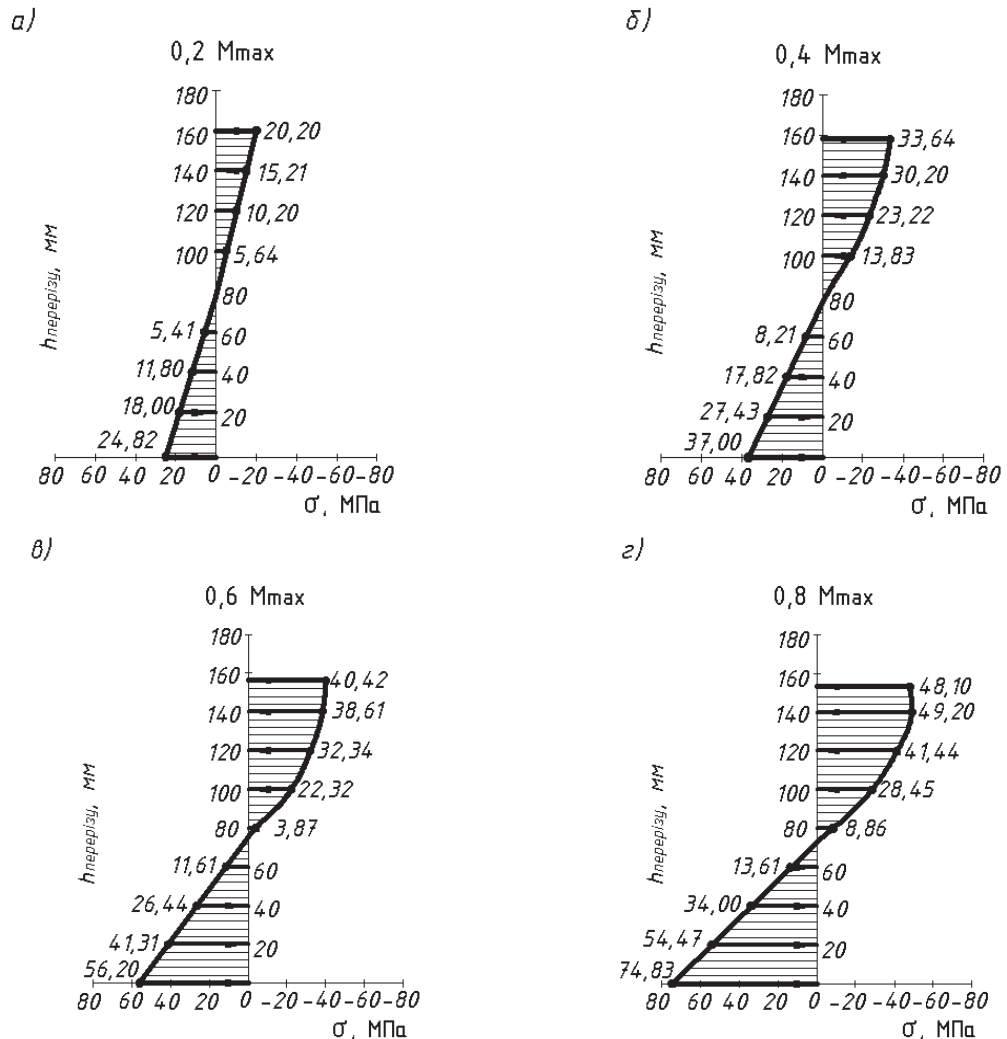


Рис. 7 – Розвиток напружень стиснутої та розтягнутої зони балки БДК-1 в зоні чистого згину за рівнів навантаження: а)  $M=0,2 M_{\max}$ ; б)  $M=0,4 M_{\max}$ ; в)  $M=0,6 M_{\max}$ ; г)  $M=0,8 M_{\max}$

Розподіл напружень по всьому поперечному перерізі дощатоклеєної балки БДК-2, БДК-3 та БДК-4 мав схожий характер. За рівня навантаження  $0,2M_{\max}$ ,  $0,4M_{\max}$ ,  $0,6M_{\max}$  балки працювали в II стадії напружено-деформованого стану, за рівня навантаження  $0,8M_{\max}$  в III стадії з утворенням складки в стиснутій зоні.

З метою порівняння напружень дерев'яних балок в умовах косоного згину, які визначені на основі експериментальних даних, з теоретичними напруженнями, було проведено їх розрахунок методом скінчених елементів. Розподіл величин напружень за висотою перерізу зразків, розрахований методом скінчених елементів, показує збіжність з експериментальними даними до рівня навантаження  $0,6F_{\max}$  включно. За рівня навантаження  $0,8F_{\max}$  в реальних умовах у стиснутій зоні балки утворюється складка, що призводить до деякого зміщення в сторону нейтральної лінії максимального значення напруження в епюрі. Цей факт методом скінчених елементів не враховується, оскільки за рівня

навантаження  $0,8F_{max}$  максимальні напруження зафіксовані у найбільш віддалених шарах перерізу експериментального зразка.

Розроблена методика розрахунку дерев'яних балок прямокутного перерізу за деформаційною моделлю заснована на таких передумовах:

- для розрахунку використовується нормальний переріз до поздовжньої осі елемента в середині прольоту балки;
- напруження в нормальному перерізі обчислювались за допомогою двох функцій 1 та 2;
- розглядаються елементи, в яких поперечний переріз елемента зазнає впливу дії косоного згину без кручення;
- середні значення тимчасового опору дерев'яних елементів прийняті як розрахункові;
- деформації стиснутої зони прийняті зі знаком мінус, розтягнутої – зі знаком плюс.

За критерій втрати несучої здатності перерізу прийнято:

- руйнування розтягнутої зони деревини відбувається при досягненні найбільш розтягнутого шару граничних значень деформацій;
- екстремальний критерій – втрата рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями.

Напруження в нормальному перерізі балки обчислювались за допомогою функцій:

$$f_1(u) = \sigma_{c,d} = k_1 \cdot u_{c,d} + k_2 \cdot u_{c,d}^2 = E_c \frac{1}{\rho} z + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 z^2 \quad (3)$$

$$f_2(u) = \sigma_{t,d} = E \cdot u_{t,d} = E_t \frac{1}{\rho} z \quad (4)$$

Зусилля стиску в нормальному перерізі елемента буде дорівнювати:

$$N_c = b \left( E_c \frac{1}{\rho} \frac{z_{1c}^2}{2} + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \frac{z_{1c}^3}{3} \right) + E_c \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{2c}^3}{3} + E_c \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{2c}^2}{2} + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_1 \frac{z_{2c}^4}{4} + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_2 \frac{z_{2c}^3}{3} - E_c \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{1c}^3}{3} - E_c \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{1c}^2}{2} - k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_1 \frac{z_{1c}^4}{4} - k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_2 \frac{z_{1c}^3}{3} \quad (5)$$

Зусилля розтягу в нормальному перерізі згинального елемента:

$$N_t = E_t \frac{1}{\rho} b \frac{z_{1t}^2}{2} + E_t \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{2t}^3}{3} + E_t \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{2t}^2}{2} - E_t \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{1t}^3}{3} - E_t \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{1t}^2}{2} \quad (6)$$

Згинальний момент від нейтральної лінії для стиснутої зони в нормальному перерізі дорівнює:

$$M_c = b \left( E_c \frac{1}{\rho} \frac{z_{1c}^3}{3} + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \frac{z_{1c}^4}{4} \right) + E_c \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{2c}^4}{4} + E_c \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{2c}^3}{3} + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_1 \frac{z_{2c}^5}{5} + k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_2 \frac{z_{2c}^4}{4} - E_c \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{1c}^4}{4} - E_c \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{1c}^3}{3} - k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_1 \frac{z_{1c}^5}{5} - k_2 \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 a_2 \frac{z_{1c}^4}{4} \quad (7)$$

Згинальний момент від нейтральної лінії для розтягнутої зони в нормальному перерізі дорівнює:

$$M_t = E_t \frac{1}{\rho} b \frac{z_{1t}^3}{3} + E_t \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{2t}^4}{4} + E_t \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{2t}^3}{3} - E_t \frac{1}{\rho} a_1 \frac{z_{1t}^4}{4} - E_t \frac{1}{\rho} a_2 \frac{z_{1t}^3}{3} \quad (8)$$

Згинаючий момент, який може сприйняти балка обчислюється за формулою:

$$M = M_c + M_t; \quad (9)$$

Для визначення згинаючого моменту за формулою 9, який може сприйняти балка, необхідно значення відносних деформацій, за яких виконується умова рівноваги зусиль  $N_c = N_t$ , підставити у формули 7,8. Згинаючий момент, який може сприйняти балка поперечним перерізом 100x150 мм за кута нахилу  $10^\circ$ , становить  $M = 18,72 \text{ кНм}$ , за кута нахилу  $25^\circ$  –  $M = 17,1 \text{ кНм}$ .

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу щодо встановлення реального напружено-деформованого стану балок з цільної та клеєної деревини, які знаходяться в умовах косоного згину від початку прикладання навантаження і до руйнування, що дозволяє проектувати такі елементи з повним використанням їх несучої здатності. Основними висновками, які відображають результати дисертаційної роботи, є наступні:

1. Проведений аналіз існуючих експериментально-теоретичних досліджень показав, що робота дерев'яних балок за дії одноразових та малоциклових повторних навантажень в умовах косоного згину практично не вивчалась та обмежується загально прийнятими правилами опору матеріалів без врахування особливостей роботи дерев'яних балок в таких умовах. Представлена в діючих нормах формула для розрахунку за косоного згину враховує роботу таких елементів лише у пружній стадії, хоча в реальних умовах дерев'яні елементи працюють у пружно-пластичній стадії.

2. Вдосконалена методика експериментальних досліджень та вивчена робота клейових швів за дії одноразових та малоциклових повторних навантажень. Встановлено вплив різних режимів повторних навантажень на роботу клейового шва. За режимів роботи  $\eta = (0,2 - 0,4)F_{ck}$ ,  $\eta = (0,2 - 0,5)F_{ck}$ ,  $\eta = (0,2 - 0,6)F_{ck}$  проходила стабілізація приростів відносних деформацій до 15 циклу, що свідчить про пристосування зразків до даних рівнів навантаження. За вищих режимів роботи  $\eta = (0,2 - 0,8)F_{ck}$ ,  $\eta = (0,2 - 0,9)F_{ck}$  відносні деформації невпинно зростали, що призводило до руйнування зразків до 22 циклу. Визначена межа міцності дослідних зразків відповідає вимогам державного стандарту України. Характер руйнування зразків по деревині вказує на те, що обраний клей в повній мірі забезпечує монолітність з'єднання дощок у виготовлених балках.

3. Розроблено методику та проведено дослідження балок з цільної деревини в умовах косоного згину за різних схем передачі навантаження. На основі проведеного аналізу отриманих величин відносних деформацій поперечного перерізу дерев'яних елементів за косоного згину при кутах нахилу  $10^\circ$  та  $25^\circ$ , прогинів, несучої здатності, визначена оптимальна схема випробувань – влаштування в'язей в місцях прикладання зосереджених навантажень та на



опорах. Руйнування всіх балок проходило в зоні чистого згину. За рівня навантаження  $0,8M_{max}$  спостерігалось утворення складок в стиснутій зоні чистого згину.

4. Розроблено методику та проведено експериментально-теоретичні дослідження дощатоклеєних балок в умовах косоного згину. Проведений аналіз зміни положення нейтральної лінії показав, що починаючи з навантаження  $0,1M_{max}$  відбувається переміщення нейтральної лінії в перерізі зони чистого згину в сторону розтягнутої зони, що призводить до збільшення площі стиснутої зони на  $3,75...6,54\%$ . За збільшення кількості циклових навантажень в балках з клеєної деревини за кутів нахилу  $10^\circ$  та  $25^\circ$  на верхніх рівнях навантаження також змінювалось положення нейтральної лінії, що призводить до збільшення площі стиснутої зони.

5. На основі експериментальних випробувань дощатоклеєних балок в умовах косоного згину за різних режимів роботи малоциклових повторних навантажень і кутів нахилу  $10^\circ$  та  $25^\circ$  встановлено, що стабілізація приростів відносних деформації та повних прогинів за режимів роботи  $\eta=(0,2-0,4)M_{max}$ ,  $\eta=(0,2-0,6)M_{max}$  проходить до 20 циклу, що свідчить про пристосування балок до даних рівнів навантаження. При верхньому рівні навантаження за режиму роботи  $\eta=(0,2-0,8)M_{max}$  та кута нахилу  $10^\circ$  відносні деформації найбільш віддалених шарів поперечного перерізу балки протягом випробувань поступово збільшувались і приріст від першого до 250 циклу в стиснутій зоні склав  $2,4\%$ , в розтягнутій –  $5,02\%$ . При режимі роботи  $\eta=(0,2-0,9)M_{max}$  за кута нахилу  $10^\circ$  протягом 100 циклів випробувань приріст відносних деформацій найбільш віддалених шарів поперечного перерізу балки невпинно зростав і в стиснутій зоні становив  $8,58\%$ , а в розтягнутій –  $10,76\%$ . За рахунок високого верхнього рівня навантаження величини відносних деформацій стиснутої та розтягнутої зони були близькими до максимальних, незначний ріст яких призвів до руйнування балки.

6. Проведено розрахунок балок з цільної та клеєної деревини методом скінчених елементів. Результати показали, що граничні значення моментів, визначені даним методом, менші за аналогічні експериментальні величини для балок з цільної деревини на  $46\%$  та  $54\%$  за кутів нахилу  $10^\circ$  та  $25^\circ$  відповідно, для балок з клеєної деревини – на  $15\%$  та  $39\%$  за кутів нахилу  $10^\circ$  і  $25^\circ$  відповідно. Розподіл напружень в розтягнутій зоні поперечного перерізу моделей балок показав аналогічну картину з експериментальними даними. Максимальні значення напружень спостерігаються в найбільш віддалених від нейтральної лінії шарах балки, а площа стиснутої зони більша за розтягнуту. Значення максимальних напружень стиснутої зони, визначених методом скінчених елементів, за рівня навантаження  $0,8F_{max}$  в найбільш віддалених шарах відрізняється від реальних експериментальних даних і вказує на те, що даний метод не враховує в повній мірі особливості роботи дерев'яних балок за косоного згину, а саме утворення складки в стиснутій зоні безпосередньо перед руйнуванням.

7. Вперше обґрунтовано передумови та розроблено методику розрахунку дерев'яних балок в умовах косоного згину, в основу якої покладена розрахункова

деформаційна модель, що враховує дійсну роботу деревини стиснутої зони згинального елемента, яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан нормальних перерізів на всіх стадіях роботи від початку завантаження і до руйнування за дії одноразових навантажень. За даною методикою визначена несуча здатність косозігнутих дощатоклеєних балок при кутах нахилу  $10^\circ$  та  $25^\circ$ .

8. Проведено аналіз розвитку напружень в стиснутій та розтягнутих зонах поперечного перерізу балки в умовах косоного згину за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень. Встановлено, що руйнування косозігнутих балок з клеєної деревини розпочинається з утворення складки в стиснутій зоні чистого згину, після чого відбувається руйнування крайньої дошки розтягнутої зони. Тріщина з крайньої дошки поширюється на верхні шари клеєної балки, що призводить до руйнування зразка в цілому. Утворення складки в стиснутій зоні балки на епюрах напружень підтверджується деяким зменшенням величин напружень в найбільш віддалених від нейтральної лінії волокнах деревини. Аналіз характеру роботи, величин напружень та форми епюри напружень показав, що за рівнів навантажень  $0,2M_{max}$ ,  $0,4M_{max}$  та  $0,6M_{max}$  дерев'яні балки працюють в другій стадії напружено-деформованого стану без складки в стиснутій зоні. За рівня навантаження  $0,8M_{max}$  косозігнуті балки з цільної та клеєної деревини працюють в III стадії напружено-деформованого стану з утворенням складки в стиснутій зоні.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гомон С. С. Деформативність балок з цільної деревини в умовах косоного згину / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 33. – С. 135–140.
2. Гомон С. С. Работа балок из цельной и клееной древесины при косом изгибе / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Вестник Белорусско-Российского университета: сб. науч. трудов. – Могилев: БРУ, 2017. – Вып. 3(56). – С. 111–121.
3. Гомон С. С. Работа дощатоклеєних дерев'яних балок в умовах косоного згину при дії одноразових та повторних навантаженнях / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2017. – Вип. 34. – С. 118–128.
4. Гомон С. С. Жорсткість балок з цільної деревини за косоного згину в залежності від характеру обпирання і прикладання навантаження / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 32. – С. 143–149.
5. Гомон С. С. Жорсткість балок з клеєної деревини в умовах косоного згину / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Будівельні конструкції: теорія і практика: зб. наук. праць. – К.: КНУБА, 2017. – С. 69–74.
6. Гомон С. С. Розрахунок косозігнутих дерев'яних балок з використанням деформаційної моделі / С. С. Гомон, П. С. Гомон, А. П. Павлюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2018. – Вип. 36. – С. 87–95.

7. Павлюк А. П. Методика дослідження балок з цільної та клеєної деревини в умовах косоного згину / А. П. Павлюк, С. С. Гомон // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – Вип. 32. – С. 231–236.

8. Гомон С. С. Робота дерев'яних балок в умовах косоного згину / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 31. – С. 422–228.

9. Гомон С. С. Зміна положення нейтральної лінії балок з цільної деревини за косоного згину в залежності від характеру обпирання і прикладання навантаження / С. С. Гомон, А. П. Павлюк, М. В. Поліщук // Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: зб. наук. праць. – К.: КНУБА, 2016. – С.120–127.

10. Павлюк А. П. Робота балок з цільної деревини в умовах прямого та косоного згину / А. П. Павлюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – Вип. 5. – С. 259–266.

11. Gomon S. S. Study on working peculiarities of glue laminated beams under conditions of slanting bending / S. S. Gomon, A. P. Pavluk // Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія: міжнародний науково-виробничий журнал. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 7. – С. 42–48.

12. Гомон С. С. Робота балок з клеєної деревини в умовах косоного згину / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Вісник Львівського національного аграрного університету. – Львів: ЛНАУ, 2018. – Вип. 19. – С. 84–89.

13. Гомон С. С. Жорсткість балок з цільної деревини в умовах прямого та косоного згину / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції з міжнародною участю «Ресурсозберігаючі технології в проектуванні, землевпорядкуванні та будівництві». – Кременчук, 2017. – С. 191–202.

14. Гомон С. С. Изменение положения нейтральной линии балок из цельной древесины за косоного изгиба / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Материалы юбилейной международной конференции «Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития». – Могилев, 2016. – С. 89–90.

15. Гомон С. С. Дослідження роботи клейових швів конструкцій з деревини за дії повторних навантажень / С. С. Гомон, А. П. Павлюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 117–122.

16. Гомон С. С. Дослідження роботи деревини на сколювання вздовж волокон за дії повторних навантажень / С. С. Гомон, А. П. Павлюк, О. В. Ющук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 30. – С. 116–122.

## АНОТАЦІЯ

**Павлюк А.П. Напружено-деформований стан елементів з клеєної деревини в умовах косоного згину – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2019.

Дисертація присвячена дослідженню балок з цільної та клеєної деревини, які знаходяться в умовах косоного згину. Проведено експериментальні дослідження даних балок за різних кутів нахилу. Встановлено характер їх руйнування та деформування. Визначено величини напружень на різних рівнях навантаження від початку прикладання зовнішнього зусилля до руйнування. Виконано розрахунок моделей аналогічних до експериментальних методом скінчених елементів. Проведено порівняння величин напружень та прогинів з експериментальними даними. Визначено зміну положення нейтральної лінії балок на різних рівнях навантаження.

Проведено експериментальні дослідження дощатоклеєних дерев'яних балок в умовах косоного згину за дії повторних малоциклових навантажень. Описано роботу за різних рівнів навантаження та кількості циклів. Визначені величини напружень та деформацій. Проведено аналіз напружено-деформованого стану балок з клеєної деревини протягом дії малоциклових повторних та одноразових навантажень.

Розроблено методику та проведено розрахунок несучої здатності дощатоклеєних дерев'яних балок за допомогою деформаційної моделі, яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан нормальних перерізів елементів в умовах косоного згину на всіх стадіях їхньої роботи.

**Ключові слова:** косий згин, дерев'яні балки, несуча здатність, напружено-деформований стан, деформаційна модель, жорсткість.

## АННОТАЦИЯ

**Павлюк А.П. Напряженно-деформированное состояние элементов из клееной древесины в условиях косоного изгиба – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет водного хозяйства та природопользования, Ровно, 2019.

Диссертация посвящена исследованию балок из цельной и клееной древесины, которые находятся в условиях косоного изгиба. Проведены экспериментальные исследования данных балок при различных углах наклона. Установлен характер их разрушения и деформирования. Определены величины напряжений на различных уровнях нагрузки от начала приложения внешнего усилия к разрушению. Выполнен расчет моделей аналогичных к экспериментальным методом конечных элементов. Проведено сравнение величин

напряжений и прогибов с экспериментальными данными. Определены изменение положения нейтральной линии балок на разных уровнях нагрузки.

Проведены экспериментальные исследования дощатоклееных деревянных балок в условиях косоугольного изгиба при действии повторных малоцикловых нагрузок. Описана работа при различных уровнях нагрузки и количестве циклов. Определены величины напряжений и деформаций. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния балок из клееной древесины в течение действия малоцикловых повторных и одноразовых нагрузок.

Разработана методика и проведен расчет несущей способности дощатоклееных деревянных балок с помощью деформационной модели, которая позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние нормальных сечений элементов в условиях косоугольного изгиба на всех стадиях их работы.

**Ключевые слова:** косоугольный изгиб, деревянные балки, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, деформационная модель, жесткость.

## ABSTRACT

### **A. Pavluk. Stress strain state of laminated wood elements in terms of slanting bend – Qualifying scientific work on the manuscript.**

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – National University of Water and Environment Management, Rivne, 2019.

In the introduction of the dissertation, the relevance of the chosen topic and its connection with scientific programs and themes are presented.

In Section 1, an overview of existing domestic and foreign literary sources in the field of studying the work of wood as a building material and structures from it. The analysis of the research of the work of elements from the whole and glued wood on compression, tensile, bend, oblique bend is carried out. According to the analysis of existing studies of oblique bending of wooden beams, it was found that the current norms of calculations of obliquely curved beams take into account their work only if the direction of the load action passes through the center of gravity of the cross section of the calculated element. In addition, the rules in force allow us to calculate the strength of beams of the oblique bend only in the elastic stage of their work, while in real conditions, wooden elements work elastically-plastic.

Section 2 describes the method of experimental studies of solid wood beams in the conditions of oblique bending. Several variants of load transfer have been developed for the data of beams of the oblique bend that reduce the effect of torque to find the optimal test scheme. On the basis of the revealed optimal test scheme, a method of research of birch-beamed beams in conditions of oblique bend under the influence of single loads. In addition, a method of researching beams from glued wood for oblique bending under the influence of low-cycle repeated loads is described, and the modes of their operation at different angles of inclination are given.

In order to determine the strength of the adhesive seam, as one of the main characteristics of glued wooden structures, a method of experimental testing of the strength of adhesive seams of samples cut from boards-glued beams has been developed. The tests were conducted for the effects of one-time and repeated loading.

Section 3 presents the results of experimental studies on the strength of adhesive seams in the effects of short-term single-use and repetitive low-cycle loads. The established limit of the durability of the test specimens and the nature of their destruction on the wood indicates that the selected adhesive in full ensures the monolithic bonding of boards in the produced beams.

Section 4 presents the results of experimental testing of solid and glued beams on different load transfer schemes on test beams. On the basis of the analysis of the obtained values of the relative deformations of the work of wooden elements from the whole wood, the deflections, the bearing capacity, an optimal scheme of tests is determined - placement of the joints in places of application of concentrated loads and on supports. On the basis of determining the optimal test scheme, experimental tests of boards-glued wooden beams under skew flexion under the influence of disposable loads have been carried out. The position of the neutral line of beams is determined on the basis of the established relative deformations along the height of the section at different load levels from the beginning of loading to the destruction of the oblique bend. The bearing capacity of beams on the boundary states of the second group is determined.

It was established that the destruction of beams from the whole and glued wood for the oblique bend began with the rupture of the extreme stretched fibers, followed by the expansion of the rupture on the upper layers and passed in the zone of pure bending. The destruction of beams was preceded by the formation of a fold in the compressed zone at the load level  $0,8M_{max}$ . Tests of boards-glued beams for the effects of low-cycle repeated loads showed that the values of relative deformations and their growth depends on the upper level of loading.

In Section 5, the theoretical calculation of the stresses in the experimental beams made of solid and glued timber was performed. The analysis of the nature of work, the magnitude of stress and the shape of the stress pattern shows that at the level of loading  $0,2M_{max}$ ,  $0,4M_{max}$  and  $0,6M_{max}$  wooden beams work in the second stage of a stress-strain state, at the level of loading  $0,8M_{max}$  the beams of solid and laminated wood work in the III stage of the stress-strain state.

The method of calculating the bearing capacity of beams behind the oblique bend using a strain model, which takes into account the stress distribution in compressed and stretched zones of the calculated section of the beam, including the formation of the fold in a compressed zone of pure bend, is developed. According to the developed method, the bearing capacity of the boards-glued beams is determined and compared with the magnitudes of destructive loads determined experimentally.

The calculation of wooden beams by the finite element method is carried out. It was established that the values of the maximum stresses of the compressed zone at the load level  $0,8M_{max}$  in the most remote layers differs from the actual experimental data and indicates that the method of finite elements does not fully take into account the peculiarities of the work of the wooden beams behind the oblique bend, namely the formation of the fold in the compressed zone immediately before destruction.

**Keywords:** slanting bend, wooden beams, bearing capacity, stress-strain state, deformation model, stiffness.

Підписано до друку 12.03.2019р. Формат 29.7×42  $\frac{1}{4}$

Наклад 100 прим. Зам. № 2019-13

Віддруковано у комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Національного університету водного господарства та природокористування  
м. Рівне, вул. Соборна, 11.