

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.265-281

УДК 691.11 (620.17)

Бітюков Д.О.,

bitiukov.do@gmail.com, ORCID: 0009-0002-1438-7595,

доктор техн. наук, професор Білик С.І.,

vartist@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8783-5892,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛОК З МАСИВНОЇ, КЛЕЄНОЇ ТА ПЕРЕХРЕСНО-КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ

Представлені комплексні експериментальні дослідження деформаційних характеристик трьох видів дерев'яних конструкційних матеріалів: масивної, клеєної та перехресно-клеєної деревини. Основна мета дослідження полягала в оцінці механічних властивостей, ефективності та поведінки цих матеріалів. Експериментальний підхід включав аналіз залежностей між зусиллям і прогином, розраховано модифіковані модулі деформації (модулі деформації з урахуванням модулів зсуву), а також побудовано експериментальні графіки деформацій та модулів деформацій досліджуваних екземплярів. Визначено перехідні коефіцієнти між досліджуємими типами деревини. Цей аналіз забезпечив чітке розуміння механічних реакцій кожного типу матеріалу під дією навантажень. Отримані результати вказують на знижену деформаційну стійкість перехресно-клеєної деревини порівняно із масивною та клеєною деревиною вздовж волокон. Клеєна деревина показала співвідносні результати із масивною деревиною. Кожен матеріал демонструє унікальні переваги, що підкреслює їх придатність для конкретних конструкційних застосувань на основі навантажень і експлуатаційних вимог. Рекомендується провести подальші дослідження, щоб оцінити поведінку цих матеріалів за різних факторів навколишнього середовища, вплив зміни кількості шарів ламелей клеєної та перехресно-клеєної деревини. Такі дослідження дозволять глибше зрозуміти довговічність і експлуатаційні характеристики дерев'яних матеріалів у різноманітних будівельних контекстах і розширять їх застосування в інноваційних архітектурних та інженерних рішеннях.

Ключові слова: масивна деревина; клеєна деревина; перехресно-клеєна деревина; модуль деформації; модуль зсуву; зусилля-прогин; будівельні матеріали; механічна стійкість.

Постановка проблеми. Деревина є важливим будівельним матеріалом, який широко використовується завдяки своїм унікальним властивостям:

екологічності, доступності, естетичній привабливості та високому співвідношенню міцності до ваги [1]. Натомість згідно з працями [2,3] у сучасному будівництві зростає потреба у матеріалах, здатних забезпечувати високу надійність та довговічність у складних умовах експлуатації. Що в свою чергу стимулює розвиток нових технологій обробки деревини, таких як виготовлення клеєних та перехресно-клеєних дерев'яних елементів.

Проте на сьогодні існує необхідність глибшого дослідження поведінки різних типів дерев'яних конструкцій. Зокрема особливу увагу у дослідників привертає питання порівняння деформаційних характеристик масивної, клеєної та перехресно-клеєної деревини для визначення їх ефективності в реальних умовах експлуатації.

Актуальність необхідності проведення вище зазначених досліджень обумовлена розвитком сучасного будівництва, яке вимагає надійних, екологічних і економічно ефективних матеріалів, а також необхідністю створення універсальних моделей для прогнозування поведінки дерев'яних конструкцій у процесі проектування.

У даній роботі акцент зроблено на експериментальних дослідженнях трьох типів дерев'яних балок – з масивної, клеєної та перехресно-клеєної деревини. Проведено аналіз залежностей зусилля/прогин, розраховано модулі деформації з урахуванням модулів зсуву, а також визначено перехідні коефіцієнти між різними типами деревини. Отримані результати плануються використовувати при аналізі наступних досліджень та у аналітичних розрахунках.

Таким чином, робота є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки спрямована на покращення розуміння механічної поведінки сучасних дерев'яних матеріалів та їх раціонального використання у будівництві.

Аналіз досліджень. Аналіз фахових джерел по піднятому в данній статті питанню показує значні досягнення в дослідженнях механіки деревини та дерев'яних конструкцій, зокрема у вивченні їх міцності, деформацій та поведінки під різними навантаженнями. Зокрема у монографії Гомон С.С. (2019) [1] розглянуто напружено-деформований стан елементів з деревини при одноразових і повторних навантаженнях, розроблено деформаційну методику розрахунку таких елементів. Дослідження є фундаментальним у визначенні основних параметрів деформації дерев'яних конструкцій, але потребує уточнення для складних комбінованих навантажень.

В праці [2] запропоновано рекомендації щодо розрахунку несучої здатності дерев'яних балок під поперечним згином з використанням деформаційної моделі. Вдосконалено підхід до прогнозування міцності, але

необхідні експериментальні дослідження з більшою варіативністю геометрії балок.

Результатами роботи [3] вказано на необхідність впровадження деформаційної моделі в розрахунок дерев'яних конструкцій для підвищення точності прогнозування їх міцності. Дослідження підкреслює перспективність моделі, але бракує даних щодо впливу вологісних і температурних факторів.

В науковій праці Поліщук М.В. (2022) [4] висвітлені дослідження напружено-деформованого стану клеєних дерев'яних елементів із комбінованим армуванням. Виявлено підвищення міцності при застосуванні армування, але необхідно додатково вивчити довговічність таких конструкцій під циклічними навантаженнями.

У роботі Сасовського Т.А. (2016) [5] досліджено напружено-деформований стан балок із клеєної деревини за малоциклових навантажень. Результати є важливими для оцінки поведінки таких балок, але потребують розширення на інші типи деревини.

В дисертації Сурмай М.І. (2015) [6] розглянуто міцності дощатоклеєних балок, армованих склопластиковою і базальтовою арматурою. Дослідження показало ефективність армування, але відсутній аналіз поведінки під комбінованими навантаженнями.

Внутрішнє армування клеєних балок низької якості деревини за допомогою GFRP-листів досліджено у праці [7]. Підтверджено покращення механічних характеристик, однак вплив довготривалих навантажень залишився недослідженим.

У статті [8] вивчено розташування нейтральної осі в дерев'яних балках. Запропоновано базові аналітичні методи, але відсутній розширений аналіз для конструкцій із комбінованими матеріалами.

Радіальне та тангенціальне згинання хвойних і твердих порід деревини під статичними та динамічними навантаженнями порівняно і висвітлено у статті [9]. Дослідження є актуальним, але не охоплює поведінку під впливом короткочасних ударних навантажень.

Поведінку дерев'яних колон із поздовжніми тріщинами, підсиленних CFRP-листами досліджено у праці [10]. Ефективність підсилення підтверджена, але потребує уточнення методологія для інших типів дефектів.

У статті [11] запропоновано механічну модель деформації клітинної стінки деревини. Модель корисна для теоретичних досліджень, однак її практична апробація для структурних конструкцій обмежена.

Вивчено статично-згинальні властивості деревини із поверхневим підсиленням асиметричними волокнами вивчено у роботі [12]. Підсилення виявилось ефективним, але потребує перевірки за різних умов навантаження.

Результатами роботи [13] визначено модуль пружності термічно обробленої деревини методом ультразвуку та резонансу. Методи є перспективними, але потребують адаптації для складних конструктивних елементів.

Поведінку CLT-панелей із деревини евкаліпта під короткостроковими навантаженнями досліджено у статті [14]. Результати є інноваційними, але необхідний детальний аналіз взаємодії між шарами панелей.

В праці [15] розроблено методи розрахунку напружень і деформацій при сушінні деревини розроблено. Методологія є важливою для початкової обробки матеріалу, але обмежена щодо конструкційних застосувань.

Із проведеного аналізу фахових джерел видно, що більшість сучасних робіт зосереджена на вдосконаленні методів розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яних елементів, зокрема клеєних та армованих, для підвищення точності прогнозування їх міцності. Однак існують обмеження, пов'язані з недостатнім дослідженням впливу довготривалих навантажень, температури, вологості та нестандартних умов експлуатації [16-27]. Для більш комплексних умов навантаження необхідні додаткові експериментальні дослідження, а також розширення застосування методів на інші види деревини та комбіновані матеріали. Таким чином зазначенні роботи формують значну базу знань, але подальші дослідження мають враховувати різноманітність дерев'яних матеріалів, дії складних навантажень та довготривалих впливів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мета проведення експериментальних досліджень полягає в аналізі деформаційних характеристик дерев'яних конструкцій з порівнянням ефективності різних типів деревини (масивної, клеєної та перехресно-клеєної) в умовах експлуатації.

Виконання поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

1. Проведення експериментальних досліджень трьох типів дерев'яних балок (масивних, клеєних та перехресно-клеєних);
2. Аналіз залежностей між зусиллям та прогином, а також визначення модифікованих модулів деформації (модулів деформації з урахуванням модулів зсуву) для кожного типу деревини;
3. Побудова експериментальних графіків, що описують залежності прогину балок в залежності від прикладеного навантаження;
4. Визначення перехідних коефіцієнтів між досліджуємими типами деревини.

Під час експериментальних досліджень дерев'яні балки були випробовані на лабораторному стенді у горизонтальному положенні за схемою однопрольотної балки з лівою нерухомою та правою рухомою опорами (рис.1).

Навантаження здійснювалося за допомогою механічного домкрата через механічний динамометр стиснення ДОСМ-3 (динамометр ДОСМ-3 працює за принципом визначення сили за величиною деформації силового пружного елемента, показання сили відраховуються за індикатором, який закріплений на підставі) та прикладалось до верхньої грані елемента по середині прольоту. Навантажування відбувалось у 5 етапів на кожному з яких крок навантаження зменшувався приблизно в 2 рази.

Прогин балки по середині прольоту вимірювався індикатором годинникового типу ИЧ-10 (діапазон вимірювання 0-10 мм, ціна поділки 0,01 мм).

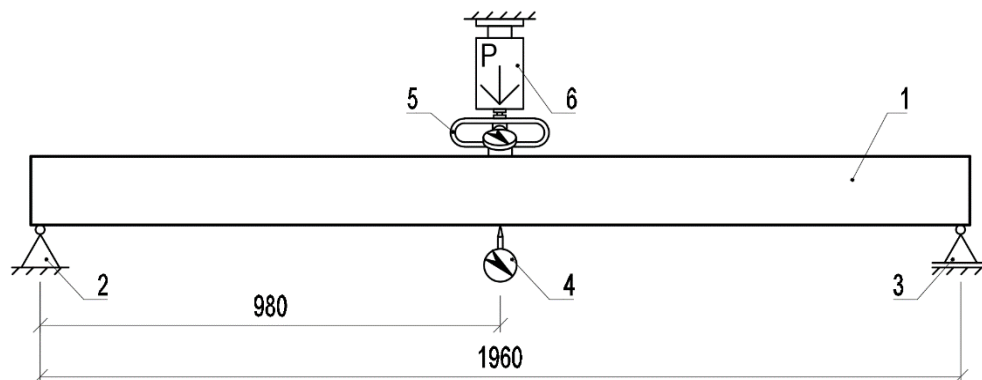


Рис. 1. Схема розміщення елементів випробувальної установки: 1 - балка; 2 - шарнірно-нерухома опора; 3 - шарнірно-рухома опора; 4 - індикатор; 5 - динамометр; 6 - домкрат.

Загалом було проведено серію з трьох експериментальних досліджень для балки кожного типу деревини. За результатами проведених досліджень були побудовані експериментальні графіки залежностей прогинів балок та модифікованих модулів деформації від навантаження.

Досліджували три типи деревини: масивну, клеєну та перехресно-клеєну. Загалом було проведено дев'ять експериментальних досліджень. Усі балки впроблялись з соснового бруса, який виготовлявся з однакової деревини та зберігався в однакових умовах.

На першому етапі дослідження було забезпечено збір даних експерименту, який включав такі параметри: навантаження (P , кН), прогин (δ , мм). Після цього виконано очищення даних, перевірено їх на наявність пропущених значень, аномалій або помилкових записів. Для зручності подальшого аналізу дані були структуровані у вигляді таблиць із чітким позначенням етапів навантаження.

Методи обробки експериментальних даних:

1. Аналіз навантаження-прогин:

- побудова залежності між зусиллям (P) і прогином (δ) для кожного типу деревини (масивна, клеєна, перехресно-клеєна).

- визначення нелінійних змін у характеристиках при підвищенні навантаження.

2. Розрахунок модуля деформації:

Згідно ДБН В.2.6.-161:2017 [28] маємо:

- прогин від згину у середині прольоту при зосередженому навантаженні у середині прольоту шарнірно обпертої балки δ_f :

$$\delta_f = \frac{P}{4E_0 b} \left(\frac{l_{ef}}{h} \right)^3 \quad (1)$$

- підвищувальний коефіцієнт при зсуві k_G :

$$k_G = 1 + 1.2 \frac{E_0}{G_0} \left(\frac{h}{l_{ef}} \right) \quad (2)$$

де: P – навантаження (кН); l_{ef} – розрахунковий проліт (мм); b - ширина елемента (мм); h - висота елемента (мм); E_0 - модуль деформації вздовж волокон (кН/мм²); G_0 - модуль зсуву вздовж волокон (кН/мм²).

Повний прогин δ з урахуванням впливу зсуву визначається добутком прогину від згину δ_f на підвищувальний коефіцієнт при зсуві k_G :

$$\delta = \delta_f \cdot k_G \quad (3)$$

$$\delta = \frac{P}{4E_0 b} \left(\frac{l_{ef}}{h} \right)^3 \cdot k_G \quad (4)$$

Модуль деформації E_0 визначаємо з рівняння (4):

$$E_0 = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{P}{4b} \left(\frac{l_{ef}}{h} \right)^3 \cdot k \quad (5)$$

3. Врахування зсуву:

Врахування зсуву передбачало визначення модифікованого модулю деформації E^* , що враховує зсув балки:

$$E^* = \frac{E_0}{k_G} \quad (6)$$

$$E^* = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{P}{4b} \left(\frac{l_{ef}}{h} \right)^3 \quad (7)$$

4. Визначення перехідних коефіцієнтів:

Усереднений перехідний коефіцієнт k_δ визначається відношенням прогина балки з одного типу деревини δ_i до прогина балки з іншого типу деревини δ_j (i та j – різні типи деревини).

$$k_\delta = \frac{\delta_i}{\delta_j} \quad (8)$$

Вихідні данні для дослідження наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні данні дослідження

Масивна	Клеєна		Перехресно-клеєна	
				
Розрахунковий проліт	l_{ef}	1960	мм	
Висота елемента	h	145	мм	
Ширина елемента	b	90	мм	
Відносна вологість матеріала	RH	7	%	
Момент інерції перерізу	I	$2.286 \cdot 10^{-5}$	м ⁴	
Момент опору перерізу	W	$3.154 \cdot 10^{-4}$	м ³	

В табл.2. наведено середні значення результатів дослідження дерев'яних балок з масивної деревини.

Таблиця 2

Результати дослідження дерев'яних балок з масивної
деревини

№	P , кН	δ , мм	E^* , ГПа	№	P , кН	δ , мм	E^* , ГПа
1	0.65	0.68	6.627	19	7.59	7.46	6.985
2	1.31	1.33	6.767	20	7.76	7.62	6.995
3	1.96	1.98	6.806	21	7.94	7.81	6.977
4	2.62	2.61	6.870	22	8.02	7.90	6.970
5	3.27	3.28	6.847	23	8.11	8.00	6.961
6	3.92	3.92	6.881	24	8.20	8.08	6.963
7	4.58	4.54	6.925	25	8.29	8.17	6.955
8	4.88	4.83	6.938	26	8.37	8.25	6.962
9	5.19	5.12	6.958	27	8.42	8.31	6.950
10	5.49	5.42	6.962	28	8.46	8.36	6.947
11	5.80	5.70	6.981	29	8.50	8.40	6.944
12	6.10	6.00	6.988	30	8.55	8.46	6.934
13	6.41	6.32	6.964	31	8.59	8.50	6.933
14	6.72	6.61	6.970	32	8.63	8.56	6.923
15	6.89	6.79	6.968	33	8.68	8.60	6.927
16	7.06	6.94	6.983	34	8.72	8.65	6.920
17	7.24	7.12	6.982	35	8.76	8.68	6.925
18	7.41	7.28	6.987	36	8.81	8.74	6.917

Аналіз даних (табл.2). показує, що під час навантаження до розрахункового значення масивна деревина зберігає свої основні фізико-механічні властивості, що говорить про її довговічність та придатність для тривалого використання.

Масивна деревина демонструє високу механічну стійкість та поступовість у зміні параметрів під впливом навантажень. Стабільність значень модифікованого модуля деформації (рис.2) вказує на те, що матеріал має достатньо рівномірний розподіл напружень по своїй структурі, що запобігає локальним деформаціям, що особливо важливо для будівельних конструкцій, де недопустимі різкі прогини чи руйнування.

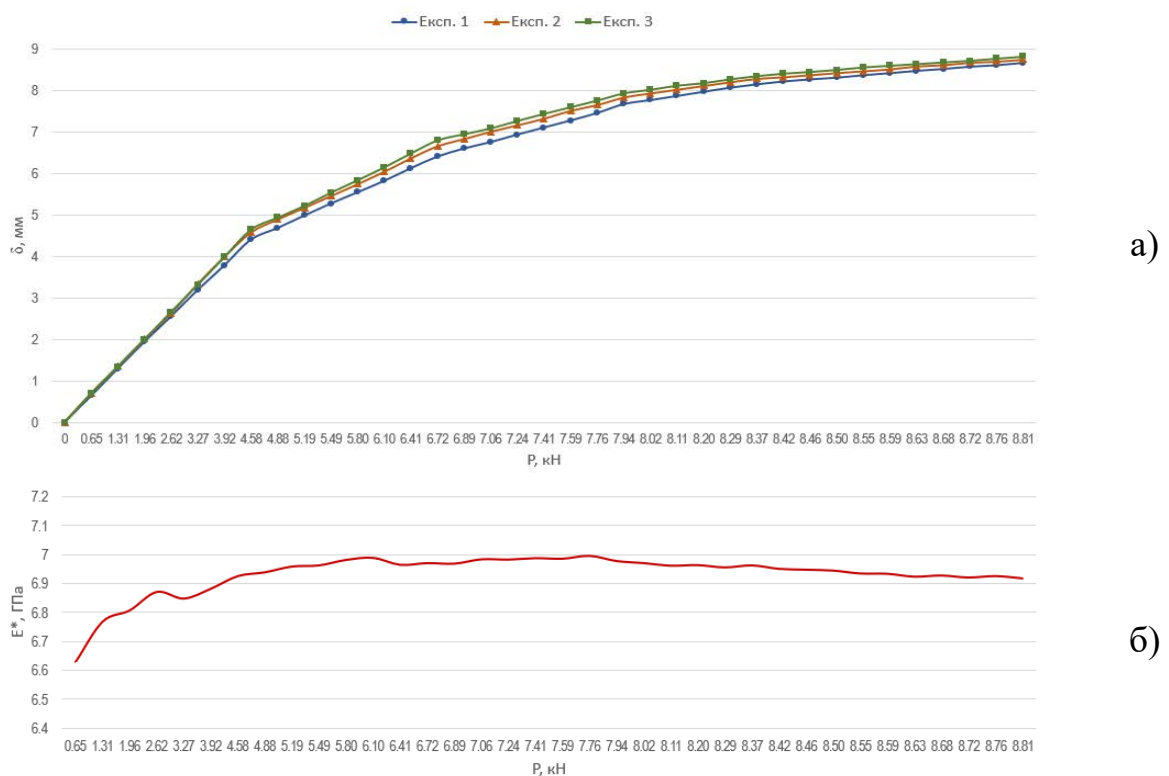


Рис. 2. Результати дослідження дерев'яних балок з масивної деревини:
 а) Залежності між зусиллям P і прогином δ ;
 б) Середнє значення модифікованого модулю деформації E^* .

В табл.3. наведено середні значення результатів дослідження дерев'яних балок з клеєної деревини.

Таблиця 3

Результати дослідження дерев'яних балок з клеєної деревини

№	P , кН	δ , мм	E^* , ГПа	№	P , кН	δ , мм	E^* , ГПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.65	0.74	6.055	19	7.59	7.82	6.659
2	1.31	1.43	6.286	20	7.76	8.02	6.639

1	2	3	4	5	6	7	8
3	1.96	2.10	6.407	21	7.94	8.18	6.658
4	2.62	2.73	6.577	22	8.02	8.29	6.645
5	3.27	3.34	6.729	23	8.11	8.39	6.630
6	3.92	4.03	6.685	24	8.20	8.50	6.616
7	4.58	4.70	6.681	25	8.29	8.61	6.606
8	4.88	4.98	6.731	26	8.37	8.70	6.600
9	5.19	5.28	6.749	27	8.42	8.75	6.598
10	5.49	5.63	6.700	28	8.46	8.81	6.588
11	5.80	5.96	6.675	29	8.50	8.86	6.583
12	6.10	6.28	6.675	30	8.55	8.91	6.583
13	6.41	6.62	6.642	31	8.59	8.97	6.572
14	6.72	6.92	6.661	32	8.63	9.02	6.566
15	6.89	7.13	6.630	33	8.68	9.07	6.565
16	7.06	7.31	6.633	34	8.72	9.12	6.561
17	7.24	7.51	6.619	35	8.76	9.17	6.559
18	7.41	7.66	6.639	36	8.81	9.23	6.547

Дослідження клеєних балок під навантаженням вказує на їхню підвищену деформативність, але здатність протидіяти прогинам при значних навантаженнях зберігається. Збільшення прогину у порівнянні із масивною деревиною може бути результатом перериванням волокон у зоні клеєвих з'єднань та деформації зсуву по клеєвому з'єднанню що потребує більш детальних досліджень. Балка з клеєної деревини є суцільним композитним матеріалом що працює як єдиний елемент але зі збільшеними деформативними характеристиками. Додаткові деформації зсуву перерізів відбуваються по висоті балки за лінійними законами. Модифікований модуль деформації демонструє стабільність навіть при зростанні навантаження. Клеєна деревина ефективно витримує навантаження (рис.3).

В табл.4. наведено середні значення результатів дослідження дерев'яних балок з перехресно-клеєної деревини.

Таблиця 4

Результати дослідження дерев'яних балок з
перехресно-клеєної деревини

№	P , кН	δ , мм	E^* , ГПа	№	P , кН	δ , мм	E^* , ГПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.65	0.93	4.830	16	6.32	8.08	5.367
2	1.31	1.74	5.155	17	6.41	8.21	5.359
3	1.96	2.56	5.263	18	6.50	8.32	5.360
4	2.62	3.37	5.335	19	6.58	8.43	5.360

1	2	3	4	5	6	7	8
5	3.27	4.20	5.343	20	6.67	8.54	5.358
6	3.92	5.01	5.371	21	6.76	8.64	5.367
7	4.23	5.42	5.358	22	6.80	8.72	5.351
8	4.53	5.81	5.356	23	6.85	8.80	5.341
9	4.84	6.19	5.364	24	6.89	8.85	5.341
10	5.15	6.58	5.366	25	6.93	8.91	5.339
11	5.45	6.97	5.364	26	6.98	8.97	5.336
12	5.63	7.19	5.368	27	7.02	9.03	5.338
13	5.80	7.41	5.373	28	7.06	9.08	5.338
14	5.97	7.64	5.365	29	7.11	9.14	5.337
15	6.15	7.86	5.367				

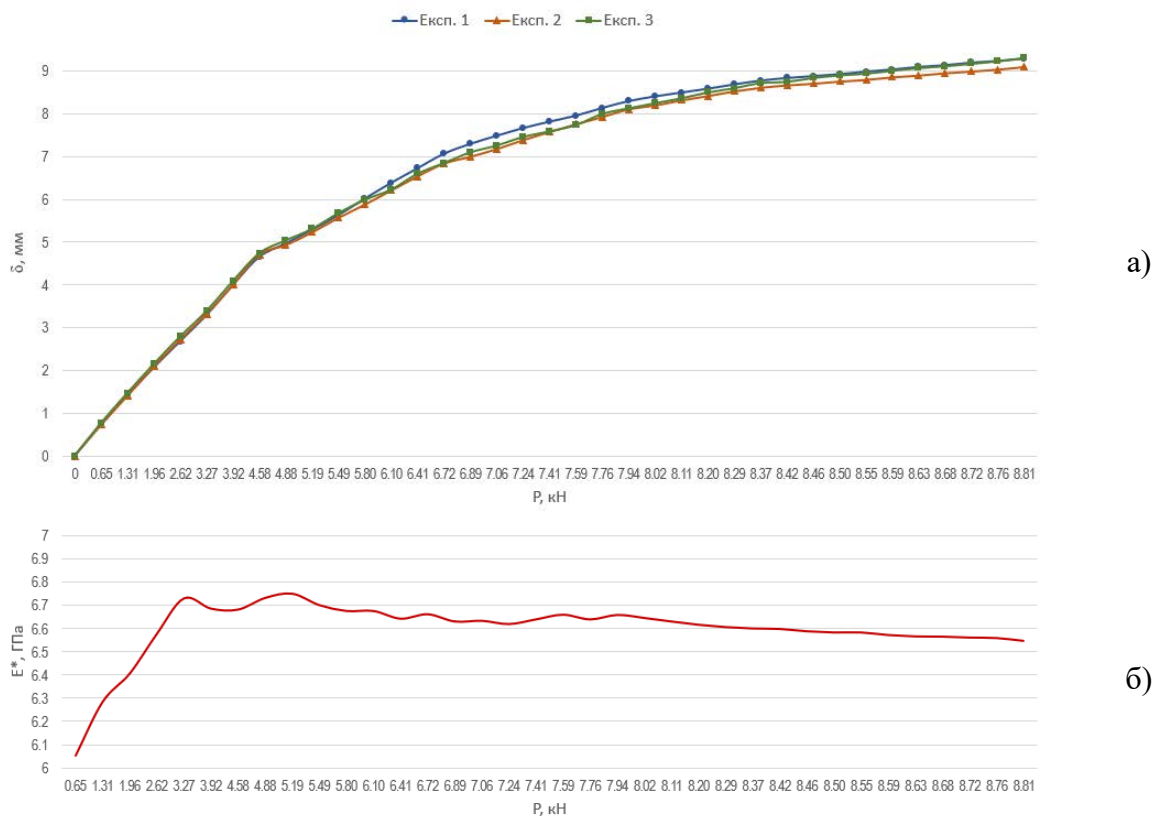


Рис. 3. Результати дослідження дерев'яних балок з клеєної деревини:
 а) Залежності між зусиллям P і прогином δ ;
 б) Середнє значення модифікованого модулю деформації E^* .

Як бачимо з табл.4. балкам із перехресно клеєної деревини властива більша деформаційність та суттєво знижений модифікований модуль деформації порівняно з масивною та клеєною деревиною (рис.4, табл. 5).

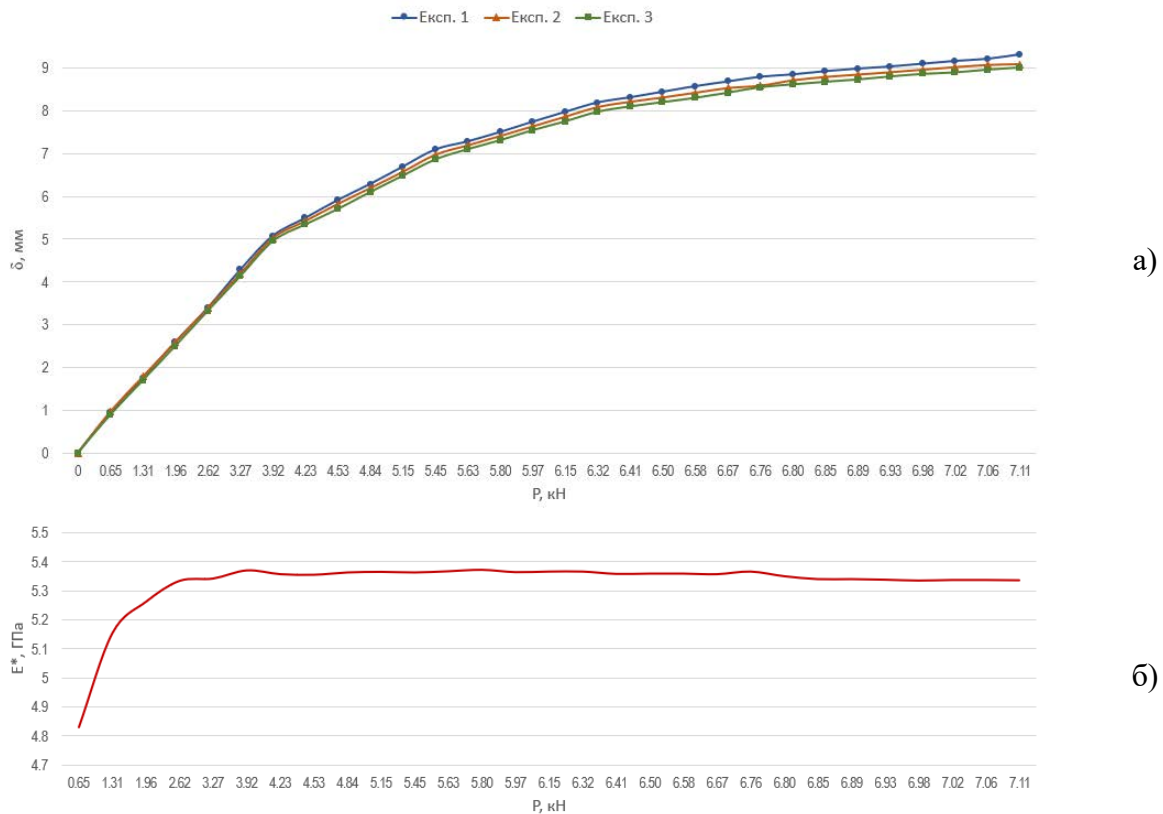


Рис. 4. Результати дослідження дерев'яних балок з перехресно-клеєної деревини: а) Залежності між зусиллям P і прогином δ ;
б) Середнє значення модифікованого модулю деформації E^* .

Таке зниження характеристик обумовлено тим що деревина у частині шарів повернута на 90° , тобто розміщена у її слабкому напрямку. Як бачимо з рис.3. прогини залишаються помірними.

Використовуючи рівняння 8 та на основі експериментальних даних табл.2, табл.3 і табл.4 визначені усереднені перехідні коефіцієнти пари деревини та коефіцієнти наведені у табл.5.

Таблиця 5

Перехідні коефіцієнти

Типи деревини	Перехідні коефіцієнти	
Масивна – клеєна	$k_{\delta,m-gl}$	0.952
Масивна – перехресно-клеєна	$k_{\delta,m-clt}$	0.769
Клеєна – перехресно-клеєна	$k_{\delta,gl-clt}$	0.805

Висновок. Проведені експериментальні випробування балок з трьох типів деревини: масивної, клеєної та перехресно-клеєної що виготовлені з деревини сосни місцевого походження для визначення їх деформаційних характеристик (прогину, модифікованого модуля деформації). Проведено по три виміри для кожного типу.

Визначено що клеєна та перехресно-клеєна деревина мають знижені жорсткостні характеристики перерізу (EI) у порівнянні із масивною. Очікувано що перехресно-клеєна деревина має найнижчі показники серед досліджуваних матеріалів, але передбачається що такий матеріал буде мати збільшені характеристики у поперечному напрямку.

За результатами експериментів отримані наступні середні значення модифікованих модулів деформації: $E_{mean,m}^* = 6.930$ ГПа, $E_{mean,gl}^* = 6.599$ ГПа, $E_{mean,clt}^* = 5.527$ ГПа. Визначені перехідні коефіцієнти між досліджуваними типами деревини: $k_{\delta,m-gl} = 0.952$, $k_{\delta,m-clt} = 0.769$, $k_{\delta,m-gl} = 0.805$. Отримані дані добре корелюються із нормативними даними [28].

Подальші дослідження можливо вести у напрямку визначення і порівняння впливу на результати досліджень кількості шарів ламелей для клеєної та перехресно-клеєної деревини, дослідження інших порід деревини, вплив недосконалостей деревини (сучків, тріщин, тощо), вплив кліматичних факторів (вологість, температура, ультрафіолетове випромінювання), можливість і доцільність використання при різних типах навантаження (динамічне довготривале, динамічне короткотривале).

Визначені фізико-механічні характеристики досліджуваних екземплярів планується використовувати у наступних дослідженнях та розрахунках балок при складному навантаженні.

Література:

1. Гомон С.С. (2019). Напружено-деформований стан і розрахунок за деформаційною методикою елементів з деревини при одноразових та повторних навантаженнях: монографія Рівне: Волинські обереги. 288 с.
2. Гомон С.С., Бабич Є.М., Павлюк А.П. (2019). Розрахунок несучої здатності дерев'яних балок за поперечного згину з використанням деформаційної моделі. Рекомендації Рівне: НУВГП. 28 с.
3. Гомон С.С., Гомон П.С., Гомон С.С., Пугач Ю.В., (2024). Щодо необхідності використання деформаційної моделі в розрахунку дерев'яних конструкцій. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, (46), 175–191. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.21>
4. Поліщук М.В. (2022). Напружено-деформований стан згинальних елементів з клеєної деревини з комбінованим армуванням: дис. докт. філософії. 192"Будівництво та цивільна інженерія" Рівне: НУВГП. 168с.
5. Сасовський Т.А. (2016). Напружено-деформований стан балок із клеєної деревини за дії малоциклових навантажень: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 (200 с.). Рівне.
6. Сурмай М.І. (2015). Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 Львів. 185 с..

7. Basterra L.A., Balmori J.A., Morillas L., Acuña L., Casado M. (2017). Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 154, 914–920.
8. Betts S.C., Miller T.H., Gupta R. (2010). Location of the neutral axis in wood beams: A preliminary study. *Wood Material Science and Engineering*, 5(3-4), 173–180. <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.500060>.
9. Borůvka V., Novák D., Šedivka P. (2020). Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading. *Forests*, 11(8), 896. <https://doi.org/10.3390/fl1080896>.
10. Cai Y.J., Zhang W., Zhang W.P. (2012). Experimental study on eccentric compression behavior of timber columns with longitudinal cracks strengthened by CFRP sheets. *Advanced Materials Research*, 446-449, 3132–3136. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.446-449.3132>.
11. Fratzl P., Burgert I., Keckes J. (2004). Mechanical model for the deformation of the wood cell wall. *International Journal of Materials Research*, 95(7), 579–584. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2004-0112>.
12. Guo X., Zhou F., Deng S., Dong C. (2023). Study on the static-bending properties of surface-reinforced wood with asymmetric fibers. *Forests*, 14(12), 2454. <https://doi.org/10.3390/fl14122454>.
13. Holeček T., Gašparík M., Lagaňa R., Borůvka V., Oberhofnerová E. (2016). Measuring the modulus of elasticity of thermally treated spruce wood using the ultrasound and resonance methods. *BioResources*, 12(1). <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.819-838>.
14. Kurata Y. (2020). A comparison of the loading direction for bending strength with different wood measurement surfaces using near-infrared spectroscopy. *Forests*, 11(6), 644. <https://doi.org/10.3390/fl1060644>.
15. Liang Y., Taoum A., Kotlarewski N., Chan A., Holloway D. (2023). Behavior of Cross-Laminated Timber Panels Made from Fibre-Managed Eucalyptus nitens under Short-Term Serviceability Loads. *Buildings*, 13(1), 245. <https://doi.org/10.3390/buildings13010245>.
16. Oberhofnerová E., Arnetová K., Holeček T., Borůvka V., Bomba J. (2016). Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering. *BioResources*, 11(2). <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.5155-5168>.
17. Perre P., Passard J. (1995). A Control-Volume procedure compared with the Finite-Element method for calculating Stress and Strain during Wood Drying. *Drying Technology*, 13(3), 635–660. <https://doi.org/10.1080/07373939508916978>
18. Rajczyk M., Jończyk D. (2019). Behavior of glulam beams strengthened with BFRP bars. *Materials Science and Engineering*, 603.
19. Rescalvo F.J., Valverde-Palacios I., Suarez E., Gallego, A. (2018). Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Composite Structures*, 186, 29–38.
20. Romanov P.G., Sivtsev P.V. (2021). Deformation features of cross-glued wooden panel structures for northern construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 625, 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/625/1/012018>.
21. Scherer G.W. (2018). Stress and strain during supercritical drying. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 90(1), 8–19. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4808-6>.
22. Sockalingam S., Casem D., Weerasooriya T., McDaniel P., Gillespie J. (2017). Experimental investigation of the high strain rate transverse compression behavior of ballistic single fibers. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 3(3), 474–484. <https://doi.org/10.1007/s40870-017-0126-2>.

23. Yahyaei-Moayyed M., Taheri F. (2011). Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. *Composite Structures*, 93, 616–628.
24. Yamaguchi K., Otsubo M., Motomura Y., Marumo Y., Shiozaki H., Kawase T. (2006). Deformation characteristics of wood structures under compression. *Materials Science Forum*, 505-507, 1051–1056. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.505-507.105.1>.
25. Yin Q., Liu H.-H. (2021). Drying stress and strain of wood: A review. *Applied Sciences*, 11(11), 5023. <https://doi.org/10.3390/app11115023>.
26. Zheng X., Li Z., He M., Lam F. (2021). Experimental investigation on the rheological behavior of timber in longitudinal and transverse compression. *Construction and Building Materials*, 304, 124633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124633>.
27. Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. (2017). Inelastic bending performances of laminated bamboo beams: Experimental investigation and analytical study. *BioResources*, 13(1). <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.131-146>.
28. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 111 с.

Post-graduate student **Bitiukov Dmytro**,
D.Sc. (Technology), Professor **Bilyk Serhii**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

DETERMINATION AND ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID, GLUED LAMINATED AND CROSS-LAMINATED TIMBER BEAMS

The article presents comprehensive experimental studies of the deformative characteristics of three types of wood structural materials: solid, glulam and cross-laminated timber. The main objective of the study was to assess the mechanical properties, efficiency and behavior of these materials. The experimental approach included an analysis of the relationships between force and deflection, calculated modified deformation moduli (deformation moduli taking into account shear moduli), and constructed experimental graphs of deformations and deformation moduli of the studied specimens. Transition coefficients between the studied wood types were determined. This analysis provided a clear understanding of the mechanical responses of each type of material under load. The results obtained indicate a reduced deformation resistance of cross-laminated timber compared to solid and glulam timber along the fibers. Glulam showed comparable results to solid timber. Each material demonstrates unique advantages, which emphasizes their suitability for specific structural applications based on loads and operational requirements. Further research is recommended to assess the behavior of these materials under different environmental conditions, the effect of varying the number of layers of glulam and cross-laminated timber. Such research will provide a deeper understanding of the

durability and performance of wood-based materials in various construction contexts and expand their applications in innovative architectural and engineering solutions.

Keywords: massive timber; glued laminated timber; cross-laminated timber; elasticity modulus; shear modulus; force-deflection; construction materials; mechanical resistance.

REFERENCES

1. Homon S.S. (2019). Napruzhenno-deformovanyi stan i rozrakhunok za deformatsiinoiu metodykoiu elementiv z derevyny pry odnorazovykh ta povtornykh navantazhenniakh: monohrafiia Rivne: Volynski oberehy. 288 p. {in Ukrainian}
2. Homon S.S., Babych Ye.M., Pavliuk A.P. (2019). Rozrakhunok nesuchoi zdatnosti derevianykh balok za poperechnoho zghynu z vykorystanniam deformatsiinoi modeli. Rekomendatsii Rivne: NUVHP. 28 p. {in Ukrainian}
3. Homon S.S., Homon P.S., Homon S.S., Puhach Yu.V., (2024). Shchodo neobkhidnosti vykorystannia deformatsiinoi modeli v rozrakhunku derevianykh konstruktsii. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, (46), 175–191. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.21>. {in Ukrainian}
4. Polishchuk M.V. (2022). Napruzhenno-deformovanyi stan zghynalnykh elementiv z kleienoii derevyny z kombinovanyim armuvanniam: dys. dokt. filosofii. 192 "Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia" Rivne: NUVHP. 168p. {in Ukrainian}
5. Sasovskyi T.A. (2016). Napruzhenno-deformovanyi stan balok iz kleienoii derevyny za dii malotsyklovykh navantazhen: dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01 (200 p.). Rivne. {in Ukrainian}
6. Surmai M.I. (2015). Mitsnist ta deformatyvnist doshchatokkleienykh balok armovanykh skloplastykovoiiu ta bazaltovoiiu armaturoiiu: dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01 Lviv. 185 p. {in Ukrainian}
7. Basterra L.A., Balmori J.A., Morillas L., Acuña L., Casado M. (2017). Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 154, 914–920. {in English}
8. Betts S.C., Miller T.H., Gupta R. (2010). Location of the neutral axis in wood beams: A preliminary study. *Wood Material Science and Engineering*, 5(3-4), 173–180. <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.500060> {in English}
9. Borůvka V., Novák D., Šedivka P. (2020). Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading. *Forests*, 11(8), 896. <https://doi.org/10.3390/f11080896> {in English}
10. Cai Y.J., Zhang W., Zhang W.P. (2012). Experimental study on eccentric compression behavior of timber columns with longitudinal cracks strengthened by CFRP sheets. *Advanced Materials Research*, 446-449, 3132–3136. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.446-449.3132> {in English}

11. Fratzl P., Burgert I., Keckes J. (2004). Mechanical model for the deformation of the wood cell wall. *International Journal of Materials Research*, 95(7), 579–584. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2004-0112> {in English}
12. Guo X., Zhou F., Deng S., Dong C. (2023). Study on the static-bending properties of surface-reinforced wood with asymmetric fibers. *Forests*, 14(12), 2454. <https://doi.org/10.3390/f14122454> {in English}
13. Holeček T., Gašparík M., Lagaňa R., Borůvka V., Oberhofnerová E. (2016). Measuring the modulus of elasticity of thermally treated spruce wood using the ultrasound and resonance methods. *BioResources*, 12(1). <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.819-838> {in English}
14. Kurata Y. (2020). A comparison of the loading direction for bending strength with different wood measurement surfaces using near-infrared spectroscopy. *Forests*, 11(6), 644. <https://doi.org/10.3390/f11060644> {in English}
15. Liang Y., Taoum A., Kotlarewski N., Chan A., Holloway D. (2023). Behavior of Cross-Laminated Timber Panels Made from Fibre-Managed *Eucalyptus nitens* under Short-Term Serviceability Loads. *Buildings*, 13(1), 245. <https://doi.org/10.3390/buildings13010245> {in English}
16. Oberhofnerová E., Arnetová K., Holeček T., Borůvka V., Bomba J. (2016). Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering. *BioResources*, 11(2). <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.5155-5168> {in English}
17. Perre P., Passard J. (1995). A Control-Volume procedure compared with the Finite-Element method for calculating Stress and Strain during Wood Drying. *Drying Technology*, 13(3), 635–660. <https://doi.org/10.1080/07373939508916978> {in English}
18. Rajczyk M., Jończyk D. (2019). Behavior of glulam beams strengthened with BFRP bars. *Materials Science and Engineering*, 603. {in English}
19. Rescalvo F.J., Valverde-Palacios I., Suarez E., Gallego, A. (2018). Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Composite Structures*, 186, 29–38. {in English}
20. Romanov P.G., Sivtsev P.V. (2021). Deformation features of cross-glued wooden panel structures for northern construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 625, 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/625/1/012018> {in English}
21. Scherer G.W. (2018). Stress and strain during supercritical drying. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 90(1), 8–19. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4808-6> {in English}

22. Sockalingam S., Casem D., Weerasooriya T., McDaniel P., Gillespie J. (2017). Experimental investigation of the high strain rate transverse compression behavior of ballistic single fibers. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 3(3), 474–484. <https://doi.org/10.1007/s40870-017-0126-2> {in English}
23. Yahyaei-Moayyed M., Taheri F. (2011). Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. *Composite Structures*, 93, 616–628. {in English}
24. Yamaguchi K., Otsubo M., Motomura Y., Marumo Y., Shiozaki H., Kawase T. (2006). Deformation characteristics of wood structures under compression. *Materials Science Forum*, 505-507, 1051–1056. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.505-507.1051> {in English}
25. Yin Q., Liu H.-H. (2021). Drying stress and strain of wood: A review. *Applied Sciences*, 11(11), 5023. <https://doi.org/10.3390/app11115023> {in English}
26. Zheng X., Li Z., He M., Lam F. (2021). Experimental investigation on the rheological behavior of timber in longitudinal and transverse compression. *Construction and Building Materials*, 304, 124633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124633> {in English}
27. Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. (2017). Inelastic bending performances of laminated bamboo beams: Experimental investigation and analytical study. *BioResources*, 13(1). <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.131-146>. {in English}
28. DBN V.2.6-161:2017. *Konstruktzii budynkiv i sporud. Dereviani konstruktzii. Osnovni polozhennia* Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2017. 111 p. {in Ukrainian}