

## БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 624.01-691

DOI 10.31649/2311-1429-2025-2-27-36

**В. О. Маєвський**  
**О. М. Удовицький**  
**З. П. Копинець**  
**М. В. Удовицька**  
**А. О. Манзюк**

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КЛЕЄНИХ БАЛОК З ВАДАМИ ДЕРЕВИНИ

Національний лісотехнічний університет України

У статті досліджено вплив природних вад деревини та недосконалостей шипових з'єднань на показники міцності й модуль пружності клеєних дерев'яних конструкційних балок (КДКБ) класу міцності С24 (KVH). Актуальність теми зумовлена широким застосуванням таких балок у сучасному будівництві, як екологічно безпечних, енергоефективних і довговічних несучих конструкцій. Мета роботи полягала у визначенні фактичних міцнісних характеристик балок KVH, виготовлених із ялинової деревини на виробничих потужностях ТОВ «Мілвуд», оцінці ефективності діючого технологічного процесу, а також у розробленні практичних рекомендацій щодо його вдосконалення.

Результати експериментальних випробувань десяти зразків КДКБ на згинання та визначення модуля пружності показали, що, попри загалом високі середні значення міцності, спостерігається значна варіабельність отриманих результатів. Коефіцієнт варіації модуля пружності перевищує 10%, а показник варіації міцності при згині сягнув близько 12%.

Встановлено, що найбільш критичними вадами, які призводять до передчасного руйнування балок, є наявність сучків (особливо у розтягнутій зоні), вихід серцевини на поверхню пиломатеріалу, а також недостатня якість проклеювання у місцях шипових з'єднань. Саме ці фактори часто зумовлюють розшарування або відриє по клейовому шеву, що значно знижує несучу здатність конструкції. У більшості випадків початок руйнування КДКБ спостерігався саме в ділянках із концентрацією дефектів або порушенням технологічних параметрів склеювання.

Отримані результати підтверджують необхідність посилення системи контролю якості деревини та технологічних процесів виробництва. Зокрема, рекомендовано вдосконалити процедури візуального сортування пиломатеріалів, оптимізувати поперечний розкрій для зменшення кількості сучків у критичних зонах, а також удосконалити технологію нанесення клею та утворення клейових з'єднань елементів. Реалізація зазначених заходів сприятиме підвищенню однорідності механічних властивостей деревини, надійності та довговічності клеєних дерев'яних конструкцій.

**Ключові слова:** конструкційні балки, клеєна деревина, вади деревини, шипове з'єднання, модуль пружності, міцність при згині.

### Вступ

Деревина є одним із найдавніших і водночас сучасних будівельних матеріалів, який широко застосовується у будівництві житлових, громадських та промислових споруд. Її популярність пояснюється екологічністю, низькою питомою вагою, зручністю обробки та високими показниками міцності відносно власної маси. Проте деревина є природним матеріалом з вираженою анізотропією та нерівномірністю структури.

Міцність дерев'яних конструкцій суттєво залежить від якості вихідної сировини та особливостей її структури, а саме від щільності, орієнтації волокон, вмісту вологи, температури. Вади (ознаки) деревини, такі як сучки, тріщини, смоляні кишені, косошаруватість або біологічні ушкодження [1, 2, 3], значно знижують її несучу здатність. Зокрема, численні експериментальні дослідження свідчать, що наявність великих сучків або тріщин у балках може зменшувати міцність елементів у межах 20-40% [4, 5] або й більше. Вади деревини можуть істотно впливати на її міцність: від локального зниження міцності на згин і розтяг до втрати цілісності елемента конструкції з деревини при дії складних напружених станів. Визначення впливу таких вад є важливим і цікавим завданням для досліджень, а усунення цих вад є основною операцією, після якої виробник може гарантувати відповідні механічні властивості продукції.

Недосконалість з'єднань – болтових, шурупних, нагельних або клеєвих – часто стає причиною передчасних руйнувань конструкцій. Неналежа підготовка поверхонь, нерівномірний розподіл клею, недостатній притиск у процесі склеювання, а також помилки при встановленні металевих кріпильних виробів знижують ефективність роботи всієї конструкції. Помилки при проектуванні з'єднань,

наприклад, неправильний вибір типу шипового чи клеєного з'єднання, а також порушення технології склеювання, призводять до концентрації напружень і зменшення довговічності конструкцій з деревини [7, 17].

В умовах сучасного будівництва, де деревину часто використовують в елементах великопрольотних конструкцій, зокрема мостів та багатоповерхових будівель, питання забезпечення їхньої надійності набуває особливої актуальності. Тому дослідження впливу вад та якості з'єднань на міцність дерев'яних клеєних балок є необхідним для створення методів прогнозування, коригування розрахунків і розроблення конструкційних рішень для отримання дерев'яних клеєних балок з підвищеною довговічністю.

У сучасних умовах проектування та експлуатації дерев'яних споруд значну увагу приділяють як підвищенню точності моделювання міцності деревини з вадами, так і оптимізації сполучних вузлів. Результати досліджень свідчать, що застосування інженерної деревини, зокрема клеєних ламельних балок (glulam) та CLT-панелей, дає змогу мінімізувати негативний вплив дефектів і вад завдяки ретельному відбору та сортуванню ламелей [6, 8]. Використання цифрових технологій (лазерного сканування, машинного візуального сортування) забезпечує можливість прогнозування міцності елементів у реальному часі [9, 10]. Водночас нові експериментальні дослідження з вивчення руйнування вузлів дерев'яних конструкцій під дією тривалих та змінних навантажень свідчать, що правильне конструювання та використання високоякісних клеїв можуть істотно підвищити довговічність з'єднань [11–16].

Таким чином, питання міцності дерев'яних конструкцій у разі використання деревини з вадами та недосконалими з'єднаннями залишається одним із ключових напрямів сучасних наукових досліджень. Подальший розвиток технологій контролю якості клеєних дерев'яних конструкційних балок (КДКБ) та вдосконалення нормативної бази дасть змогу забезпечити надійну й довговічну експлуатацію дерев'яних конструкцій.

Зважаючи на численні переваги, які демонструють клеєні конструкційні елементи з деревини у сучасному будівництві, доцільним є проведення ґрунтовного аналізу їхніх міцнісних характеристик. Одним із ключових аспектів таких досліджень є вивчення ефективності та надійності шипових з'єднань, що широко застосовують у виробництві клеєних дерев'яних балок, і які відіграють визначальну роль у формуванні загальної несучої здатності конструкції. Особливої уваги також потребує визначення модуля пружності клеєних дерев'яних балок, адже цей показник безпосередньо впливає на деформативність та довговічність дерев'яних споруд.

У рамках цієї роботи досліджено зразки клеєних дерев'яних конструкційних балок, виготовлених із цільної деревини на виробничих потужностях деревообробного підприємства ТОВ «Мілвуд». Зокрема досліджено вплив вад деревини та недосконалості з'єднань на міцність клеєних дерев'яних конструкційних балок. Одержані результати дозволять оцінити ефективність технологічного процесу, визначити вплив характеристик деревини на формування міцності клеєних дерев'яних конструкційних балок та розробити рекомендації щодо вдосконалення конструкційних рішень. Такий підхід дасть змогу не лише підтвердити переваги використання клеєних дерев'яних елементів у практиці сучасного будівництва, але й забезпечить підґрунтя для подальших наукових розробок і впровадження інноваційних технологій у деревообробній галузі.

Важливий вплив на фізико-механічні властивості майбутньої продукції мають природні вади (ознаки) деревини, які є в пиломатеріалах. Визначення та усунення цих вад є основною операцією, після якої виробник може гарантувати відповідні механічні властивості продукції.

Найбільш поширені такі основні природні вади деревини [18]: сучки, тріщини, нарости, завилькуватість, прорість, смоляні кишені, засмолок, нахил волокон, завиток, серцевина, пошкодження комахами, заболонь, грибні ураження.

Окрім природніх вад деревини в пиломатеріалах виникають дефекти, спричинені процесами розпилювання та сушіння. До таких вад відносять: тріщини після сушіння, кривизну повздовжню та поперечну, скручування у різних напрямках. Ці недоліки значно ускладнюють процес виробництва та впливають на якість майбутньої продукції, погіршують геометрію шипового з'єднання, знижують його міцність.

### **Шипове з'єднання в конструкційній деревині**

Широке застосування клеєних конструкційних балок з цільної деревини пояснюється тим, що клеєна деревина значно міцніше звичайної, оскільки в процесі виробництва з деревини вирізають всі природні вади, які негативно впливають на міцність. Після вирізання вад, постає завдання провести

зрощування майбутньої балки до заданої довжини, і при цьому не зменшити її міцність і несучу здатність. Досягається це за допомогою технології шипового з'єднання. Розмір і форма таких шипів збільшує площу склеювання, що своєю чергою збільшує міцність клеєних елементів (рис. 1).

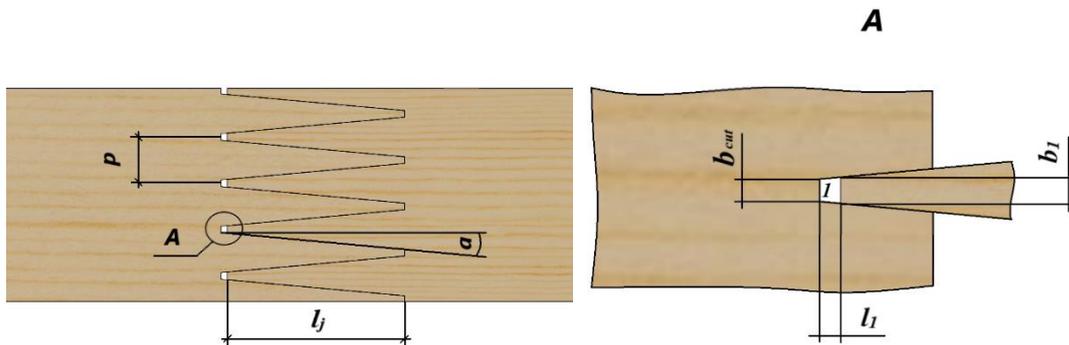


Рисунок 1 – Геометрія шипового з'єднання:  $l$  – основа зрізу,  $l_j$  – довжина зуба,  $p$  – крок з'єднання,  $a$  – кут нахилу,  $l_1$  – ширина вершини зуба,  $b_{cut}$  – ширина зуба,  $b_1$  – ширина основи зуба [19]

Тиск пресування, здебільшого, залежить від виду деревини, поперечного перерізу клеєного конструкційного елемента і геометрії шипового з'єднання. Показники тиску пресування для різних геометричних параметрів шипового з'єднання наведені в табл. 1 [20]. Тривалість дії тиску на шипове з'єднання є часом пресування і зазначається як мінімально необхідний. Час пресування для шипового з'єднання у нормативній документації EN 14080 [17] і EN 15497 [19] визначений як 2 секунди.

Таблиця 1

Параметри і розміри шипових з'єднань [20]

Значення геометричних параметрів з'єднання, мм			Максимальний тиск при зрощенні, МПа
Довжина зуба $l_j$	Крок з'єднання $p$	Ширина вершини зуба $l_1$	
50	12,0	2,0	4,0
32	8,0	1,0	8,0
20	6,2	1,0	10,0
10	3,8	0,6	12,0
4	1,6	0,2	13,0

В зоні шипового з'єднання не допускають сучки діаметром більше 5 мм. Сучки, які допускаються технічними вимогами, що не чинитимуть вирішального впливу на показники міцності пиломатеріалів, повинні знаходитися від основи шипа на відстані не менше трьох розмірів сучка, як зображено на рисунку 2.

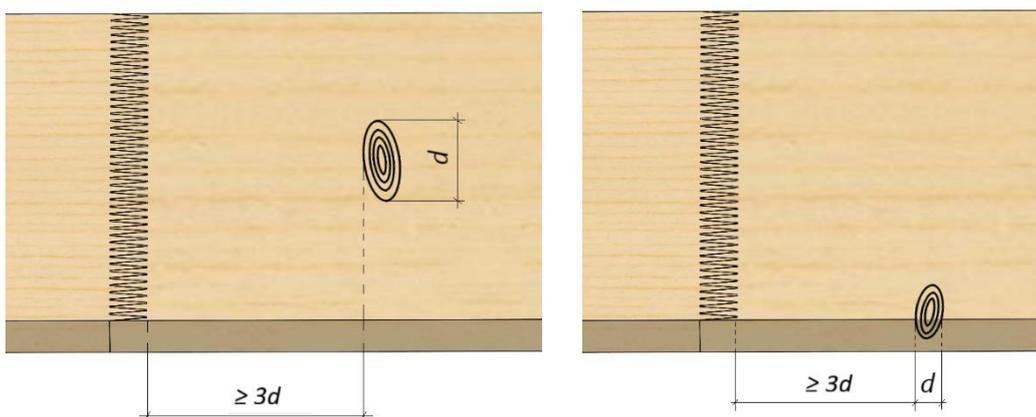


Рисунок 2 – Найменша допустима відстань між основою шипа і сучком [19]

Шипове з'єднання утворюють з використанням клеїв. Клей, який використовують в процесі виробництва, має забезпечити таку міцність шипового з'єднання, що не змінить характеристик міцності конструкції впродовж передбачуваного періоду її використання.

Клеї, які використовують для виробництва дерев'яних конструкцій, повинні забезпечувати вищу міцність вузла склеювання, ніж міцність самої деревини [24]. Так для шипового з'єднання європейськими стандартами EN 301, EN 302 та EN 16254 передбачено використання таких клеїв [25–27]: - меламінові клеї (MF, меламін-формальдегідні клеї); - поліуретанові клеї (PUR, поліуретан, ПУ); - клейові системи (EPI, Емульсійні полімер-ізоціанатні клеї).

Для подальшого склеювання, пиломатеріали відповідно до вимог норми EN 14081 підлягають візуальному сортуванню за класами міцності C16, C24, C30. На ТОВ «Мілвуд» максимальним класом сортування визначено клас C24. Це найбільш поширений клас міцності і є достатнім для виробництва якісної конструкційної деревини.

### Особливості технологічного процесу виготовлення дерев'яних конструкційних балок на ТОВ «Мілвуд»

На дільниці сортування пиломатеріалів основним завданням є візуальне сортування залежно від наявності вад деревини. Відсортовані пиломатеріали подають в цех конструкційної деревини. Першою технологічною операцією є поперечний розкрій пиломатеріалів з оптимізацією довжини випиляних відрізків. На цьому етапі проходить поперечне вирізання вад деревини, які не допускають у класі міцності C24. На ТОВ «Мілвуд» встановлено обладнання оптимізації із тактовим контролем за вологістю (рис. 3).



Рисунок 3 – Обладнання для оптимізації довжини пиломатеріалів на ТОВ «Мілвуд»

В цьому дослідженні ми вивчаємо вплив вад деревини на основні характеристики міцності саме на прикладі ялинових балок KVH.

KVH – клеєний конструкційний брус із цільної деревини (рис. 4), який виготовляють із висушених та ретельно відсортованих пиломатеріалів відповідно до вимог стандарту EN 14080 [17]. Окремі елементи деревини з'єднують між собою за допомогою шипового з'єднання та високоякісних клеїв, що забезпечує надійність і цілісність конструкції. Попит на цей тип продукції постійно зростає завдяки його високим експлуатаційним властивостям та зручності застосування у будівництві. Основними сферами використання KVH є зведення каркасних і панельно-каркасних будівель, облаштування дахових конструкцій, а також створення малих архітектурних форм. Відповідність характеристик і властивостей цього матеріалу підтверджується сертифікацією згідно з положеннями EN 15497 [19], що гарантує його якість і безпеку для застосування в сучасному будівництві.



Рисунок 4 – Клеєна конструкційна балка з цільної деревини (KVH)

Згідно норми EN 15497 [19], KVH може бути вироблено з одного виду деревини, в нашому випадку використано ялинову деревину (*Picea abies*).

Основною якісною характеристикою KVH є клас міцності згідно з EN 338:2016 Конструкційна деревина – класи міцності [23]. Класи міцності конструкційної деревини мають велике значення при проектуванні та визначенні несучої здатності будівельних конструкцій. При проектуванні дерев'яних будинків найпоширенішим є використання класу міцності C24. Клас міцності – це сукупність характеристичних опорів: згину, розтягу вздовж волокон і поперек волокон, стискання вздовж і поперек волокон, сколюванню паралельно волокнам; показників жорсткості: модуля пружності вздовж та поперек волокон, модуля зсуву; густини деревини. Показники міцності визначали, шляхом проведення експериментальних досліджень взірців балок KVH.

### Результати дослідження

Для дослідження відібрано 10 взірців, кожен з яких перевірений на дотримання розмірів, вологості та щільності. Особливу увагу приділяли випробуванню зразків із наявними вадами деревини (рис. 5).



Рисунок 5 – Підготовка взірців до тестування

В процесі експерименту визначено величину модуля пружності клеєних дерев'яних балок та показник міцності шипового з'єднання при статичному згині.

*Мета проведених випробувань* – дослідження впливу вад деревини на показники міцності дерев'яних клеєних конструкційних балок, а також визначення показників міцності з'єднання і модуля пружності, а також встановлення їхнього відхилення від нормативних параметрів. Результати експериментальних досліджень показників міцності з'єднання і модуля пружності дерев'яних конструкційних клеєних балок наведено у табл. 2.

Таблиця 2

### Результати експериментальних досліджень показників міцності з'єднання і модуля пружності КДКБ

№ з/п	Міцність при згині $f_m$ , Н/мм <sup>2</sup>	Модуль пружності $E_{m,g}$ , кН/мм <sup>2</sup>
1	44,75	10774
2	49,62	11802
3	51,71	12509
4	45,09	9888
5	54,7	12941
6	51,33	12460
7	43	10316
8	42,12	10557
9	43,85	9527
10	47,32	10614

На рисунку 6 наведено відхилення експериментально визначених значень модуля пружності дерев'яних конструкційних клеєних балок від нормативного показника, встановленого на рівні 11000

кН/мм<sup>2</sup> для класу міцності С24. З метою оцінки ступеня відхилення індивідуальних результатів відносно їхнього нормативного значення обчислено коефіцієнт варіації, який для десяти досліджених зразків становив понад 10 %. Такий показник свідчить про достатньо значний негативний вплив вад деревини на показники міцності матеріалу.



Рисунок 6 – Відхилення модуля пружності КДКБ від нормативного значення

На рисунку 7 наведено результати розрахунку відхилення експериментально визначених значень міцності на згин дерев'яних конструкційних клеєних балок від нормативного показника, що встановлений на рівні 24 Н/мм<sup>2</sup> для класу міцності С24. Для більш детального аналізу розподілу значень розраховано коефіцієнт варіації міцності при згині, який для досліджених зразків становив 12 %. Такий рівень варіації вказує на відносно високу мінливість механічних властивостей деревини між окремими випробуваними балками.

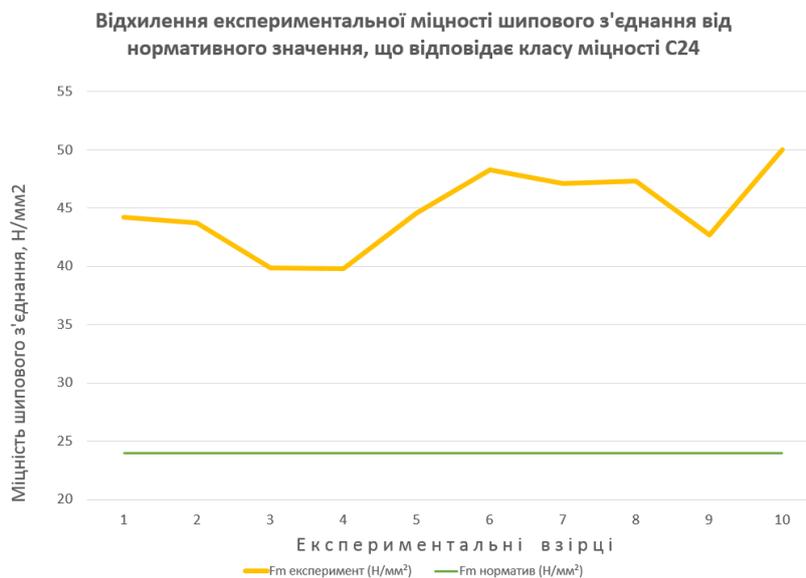


Рисунок 7 – Відхилення міцності шипового з'єднання КДКБ від нормативного значення

Під час експериментальних випробувань на згин виявлено, що клеєні дерев'яні конструкційні балки з наявними вадами проявляють різний характер руйнування залежно від типу дефекту та його розташування відносно зони найбільших напружень.

Зокрема, **сучки** виявилися найбільш критичними у нижній зоні дерев'яної конструкційної клеєної балки, яка зазнавала дії розтягувальних напружень (рис. 8). Саме в цих місцях виникала концентрація напружень, що сприяла зародженню мікротріщин у перехідній зоні між сучком та навколишніми волокнами. У подальшому тріщини розповсюджувалися вздовж волокон, спричиняючи руйнуванню

балки в околі дефекту. Якщо сучок мав значні розміри або розташовувався у центральній частині перерізу, руйнування набувало крихкого характеру, без попередніх значних деформацій.



Рисунок 8 – Характер руйнування зразків КДКБ з вадою – сучки

Наявність у структурі деревини **серцевини** також негативно впливала на міцність елементів. Руйнування відбувалося здебільшого по межі серцевини, оскільки ця зона характеризується зниженою щільністю, неоднорідною структурою та більшою кількістю мікротріщин, що накопичуються під навантаженням. Унаслідок цього спостерігалось розшарування деревини та утворення тріщин, які поширювалися радіально від центру до периферії, що суттєво знижувало несучу здатність клеєної дерев'яної конструкційної балки (рис. 9).



Рисунок 9 – Характер руйнування зразків КДКБ з вадою – серцевина

У випадку неоднорідності будови деревини (нахил волокон, різкий перехід між ранньою та пізньою деревиною, зміна щільності річних шарів) відбувалося поступове зниження жорсткості елементів. Зони з неправильним напрямком волокон сприяли розвитку похилих тріщин при згині, що призводило до втрати локальної стійкості цієї зони до навантажень. В окремих випадках деформації носили пластичний характер, але у більшості зразків спостерігалася крихка форма руйнування, яка розпочиналася саме з ділянки структурної неоднорідності.



Рисунок 10 – Характер руйнування зразків з недосконалим нанесенням клею в зоні шипового з'єднання

Особливу увагу варто приділити зразкам із недостатньо якісним проклеюванням шипових з'єднань (рис. 10). У цих випадках руйнування розпочиналося по лінії шару клею, що свідчить про недостатню адгезійну міцність з'єднання. Відшаровування відбувалося як унаслідок недостатнього просочення клеєм поверхонь, так і через наявність у зоні з'єднання мікродфектів чи порожнин. Такий тип

руйнування суттєво знижував загальну несучу здатність клеєної дерев'яної конструкційної балки, оскільки з'єднання є найбільш навантаженою частиною конструкції.

### Висновки

- Проведений аналіз дав змогу визначити основні фактори, що впливають на міцність шипового з'єднання клеєних балок. На основі результатів експериментальних досліджень виявлені негативні фактори, що впливають на параметри міцності. Запропоновані заходи для ліквідації цих негативних факторів з метою підвищення якісних характеристик продукції та підвищення ефективності виробництва клеєних конструкційних матеріалів з цільної деревини.
- У процесі випробувань на згин особливу увагу приділено зразкам клеєних дерев'яних конструкційних балок, які містили різні вади деревини. У більшості випадків руйнування таких балок розпочиналося саме в місцях концентрації вад – сучків, тріщин, нахилу волокон тощо. Характерним є те, що тріщини зароджувалися у розтягнутій зоні балки, де діють найбільші розтягувальні напруження, після чого швидко поширювалися по напрямку волокон. Для балок із наскрізними чи значними за розміром сучками відмічалось різке та крихке руйнування, тоді як у випадку дрібних локальних вад руйнування мало більш поступовий характер. Таким чином, наявність вад деревини істотно вплинула на характер і місце пошкоджень, саме вони визначали зниження несучої здатності та скорочення граничної міцності зразків порівняно з балками без вад і дефектів обробки.
- Узагальнені результати дослідження свідчать, що всі перераховані вади деревини – сучки, серцевина, неоднорідність будови та недосконалі клейові з'єднання – є факторами ризику для довговічності та міцності конструкційних елементів. Їхня наявність призводить до утворення зон концентрації напружень, зниження адгезійної міцності та передчасного руйнування дерев'яних конструкційних клеєних балок.
- Виявлено високу варіабельність механічних властивостей зразків: коефіцієнт варіації модуля пружності становив понад 10 %, а міцності на згин – 12 %. Це свідчить про значний негативний вплив вад деревини на прогнозованість міцнісних показників.
- Експериментально визначені показники міцності на згин (середні значення значно перевищують нормативний показник 24 Н/мм<sup>2</sup> для класу С24) підтвердили загалом високу ефективність технології шипового з'єднання.
- Отримані дані підтверджують необхідність ретельного сортування пиломатеріалів, контролю напрямку волокон та забезпечення якісної технології склеювання, а також вимогу щодо вчасного виявлення та видалення вад деревини, що, у свою чергу, забезпечить підвищену однорідність і надійність дерев'яних конструкцій у сучасному будівництві.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Ya. Barashkov and V. M. Kolyakova, *Budivelni konstruktsii: pidruchnyk*. Kyiv: Slovo, 2011, 255 p.
- [2] D. Mykhailovskyi, M. Komar, T. Skliarova, and B. Bondarchuk, "Zastosuvannia kleienoї ta poperechno-kleienoї derevyny pry rekonstruktsii ta novomu budivnytstvi," *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, no. 15, pp. 54–65, 2024.
- [3] C. O'Ceallaigh, K. Sikora, and A. M. Harte, "An experimental and numerical study of moisture transport and moisture-induced strain development in glued-laminated timber beams," *Maderas. Ciencia y tecnologia*, vol. 21, no. 4, pp. 555–570, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000411>.
- [4] M. Fontana and A. Frangi, "Fire performance of timber structures under natural fire conditions," *Fire Safety Science*, vol. 8, pp. 279–290, 2005. DOI: <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-279>.
- [5] R. Mirski, D. Dukarska, M. Wieruszewski, D. Dziurka, A. Trociński, and J. Kawalerczyk, "The effect of storage conditions on the strength of glulam beams," *Forests*, vol. 14, no. 2, article 281, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14020281>.
- [6] A. H. Buchanan, *Structural Design for Fire Safety*, 2nd ed. Chichester: Wiley, 2017, 437 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118735844>.
- [7] M. Tazavv, Z. Carnahan, and N. Wehbe, "Glulam timber bridges for local roads," *Engineering Structures*, vol. 188, pp. 11–23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.049>.
- [8] M. A. Ritter, *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. Washington, D.C.: USDA Forest Service, 1990, 944 p.
- [9] H. Gu, Z. Luo, R. Bergman, M. Puettmann, and I. Ganguly, "Carbon impacts of engineered wood products in construction," *Forest Products Laboratory Research Paper FPL-RP-706*, Madison, WI: USDA Forest Service, 2021, 24 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-706>.
- [10] P. Alaei and E. Frühwald, "A digital image correlation method for deformation and fracture analysis of structural timber," *Construction and Building Materials*, vol. 291, article 123268, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123268>.
- [11] H. Yang, X. Zhang, and J. Liu, "Performance of glued joints in engineered timber under cyclic loading," *Engineering Structures*, vol. 250, article 113486, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113486>.
- [12] L. Rossi, U. Müller, and M. Heeb, "Long-term durability of adhesive bonds in glulam structures," *Wood Science and Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 421–438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01413-9>.
- [13] M. Udovyt'ska, V. Mayevskyy, O. Udovyt'skyi, Z. Kopynets, and A. Manzyuk, "Development of mathematical model for predicting

- the cupping of lumber”, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, vol. 17(66), no. 2, pp. 111–126, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2024.17.66.2.7>.
- [14] S. V. Gayda, “A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood,” *ProLigno*, vol. 12, no. 1, pp. 22–31, 2016.
- [15] S. V. Gayda, “Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини],” *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, vol. 42, pp. 33–50, 2016. DOI: <https://doi.org/10.36930/42164206>.
- [16] S. V. Gayda, “Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW),” *Bulletin of KhNTUA*, no. 197, pp. 3–9, 2018 (in Ukrainian).
- [17] EN 14080:2013. *Timber Structures – Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber – Requirements*. Brussels: CEN, 2013, 88 p.
- [18] EN 14081-1+A1:2011. *Timber Structures – Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section – Part 1: General Requirements*. Brussels: CEN, 2011.
- [19] EN 15497:2014. *Structural Finger Jointed Solid Timber – Performance Requirements and Minimum Production Requirements*. Brussels: CEN, 2014.
- [20] EN 16351:2021. *Timber Structures – Cross Laminated Timber – Requirements*. Brussels: CEN, 2021, 68 p.
- [21] DBN V.2.6-161:2017. *Derev’iani konstruktsii. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2017, 111 p.
- [22] DBN V.2.6-161:2010. *Konstruktsii budynkiv i sporud. Derev’iani konstruktsii. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2011, 102 p.
- [23] DSTU EN 338:2016. *Konstruktsiina derevyna – klasy mitsnosti. Vyznachennia kharakterystychnykh znachen mekhanichnykh vlastyvostei*. Kyiv: DP “UkrNDNTs,” 2016, 15 p.
- [24] EN 1995-2: Eurocode 5: *Design of timber structures – Part 2: Bridges*. EN 1995-2:2004, Nov. 2004.
- [25] EN 301:2022. *Phenolic and Aminoplastic Adhesives for Load-bearing Timber Structures. Classification and Performance Requirements*. Brussels: CEN, 2022.
- [26] EN 302-3:2023. *Adhesives for Load-bearing Timber Structures – Test Methods – Part 3: Determination of the Effect of Acid Damage to Wood Fibres by Temperature and Humidity Cycling on the Transverse Tensile Strength*. Brussels: CEN, 2023.
- [27] EN 16254:2023. *Adhesives – Emulsion Polymer Isocyanate (EPI) for Load-bearing Timber Structures – Classification and Performance Requirements*. Brussels: CEN, 2023.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. Я. Барашиков та В. М. Колякова, *Будівельні конструкції: Підручник*. Київ: Слово, 2011, 255 с.
- [2] Д. Михайловський, М. Комар, Т. Склярова, та Б. Бондарчук, “Застосування клеєної та поперечно-клеєної деревини при реконструкції та новому будівництві,” *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, № 15, с. 54–65, 2024.
- [3] C. O’Ceallaigh, K. Sikora, and A. M. Harte, “An experimental and numerical study of moisture transport and moisture-induced strain development in glued-laminated timber beams,” *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 21, no. 4, pp. 555–570, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000411>.
- [4] M. Fontana and A. Frangi, “Fire performance of timber structures under natural fire conditions,” *Fire Safety Science*, vol. 8, pp. 279–290, 2005. DOI: <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-279>.
- [5] R. Mirski, D. Dukarska, M. Wieruszewski, D. Dziurka, A. Trociński, and J. Kawalerczyk, “The effect of storage conditions on the strength of glulam beams,” *Forests*, vol. 14, no. 2, article 281, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14020281>.
- [6] A. H. Buchanan, *Structural Design for Fire Safety*, 2nd ed. Chichester: Wiley, 2017, 437 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118735844>.
- [7] M. Tazarv, Z. Carnahan, and N. Wehbe, “Glulam timber bridges for local roads,” *Engineering Structures*, vol. 188, pp. 11–23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.049>.
- [8] M. A. Ritter, *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. Washington, D.C.: USDA Forest Service, 1990, 944 p.
- [9] H. Gu, Z. Luo, R. Bergman, M. Puettmann, and I. Ganguly, “Carbon impacts of engineered wood products in construction,” *Forest Products Laboratory Research Paper FPL-RP-706*, Madison, WI: USDA Forest Service, 2021, 24 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-706>.
- [10] P. Alaei and E. Frühwald, “A digital image correlation method for deformation and fracture analysis of structural timber,” *Construction and Building Materials*, vol. 291, article 123268, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123268>.
- [11] H. Yang, X. Zhang, and J. Liu, “Performance of glued joints in engineered timber under cyclic loading,” *Engineering Structures*, vol. 250, article 113486, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113486>.
- [12] L. Rossi, U. Müller, and M. Heeb, “Long-term durability of adhesive bonds in glulam structures,” *Wood Science and Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 421–438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01413-9>.
- [13] M. Udovytska, V. Mayevskyy, O. Udovytskyi, Z. Kopynets, and A. Manzyuk, “Development of mathematical model for predicting the cupping of lumber,” *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, vol. 17(66), no. 2, pp. 111–126, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2024.17.66.2.7>.
- [14] S. V. Gayda, “A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood,” *ProLigno*, vol. 12, no. 1, pp. 22–31, 2016.
- [15] С. В. Гайда, “Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини,” *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, vol. 42, pp. 33–50, 2016. DOI: <https://doi.org/10.36930/42164206>.
- [16] С. В. Гайда, “Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини (PCW),” *Бюлетень ХНТУА*, № 197, с. 3–9, 2018.
- [17] EN 14080:2013. *Timber Structures – Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber – Requirements*. Brussels: CEN, 2013, 88 p.
- [18] EN 14081-1+A1:2011. *Timber Structures – Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section – Part 1: General Requirements*. Brussels: CEN, 2011.
- [19] EN 15497:2014. *Structural Finger Jointed Solid Timber – Performance Requirements and Minimum Production Requirements*. Brussels: CEN, 2014.
- [20] EN 16351:2021. *Timber Structures – Cross Laminated Timber – Requirements*. Brussels: CEN, 2021, 68 p.

- [21] ДБН В.2.6-161:2017, *Дерев'яні конструкції. Основні положення*. Київ: УкрНДНЦ, 2017, 111 с.
- [22] ДБН В.2.6-161:2010, *Конструкції будівель і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення*. Київ: УкрНДНЦ, 2011, 102 с.
- [23] ДСТУ EN 338:2016, *Конструкційна деревина – класи міцності. Визначення характеристичних значень механічних властивостей*. Київ: ДП “УкрНДНЦ,” 2016, 15 с.
- [24] EN 1995-2: Eurocode 5: *Design of timber structures – Part 2: Bridges*. EN 1995-2:2004, Nov. 2004.
- [25] EN 301:2022, *Phenolic and Aminoplastic Adhesives for Load-bearing Timber Structures. Classification and Performance Requirements*. Brussels: CEN, 2022.
- [26] EN 302-3:2023, *Adhesives for Load-bearing Timber Structures – Test Methods – Part 3: Determination of the Effect of Acid Damage to Wood Fibres by Temperature and Humidity Cycling on the Transverse Tensile Strength*. Brussels: CEN, 2023.
- [27] EN 16254:2023, *Adhesives – Emulsion Polymer Isocyanate (EPI) for Load-bearing Timber Structures – Classification and Performance Requirements*. Brussels: CEN, 2023.

**Маєвський Володимир Олександрович** — д.т.н., професор, професор кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів; <https://orcid.org/0000-0001-5820-9454>, [mayevskyy\\_v@yahoo.com](mailto:mayevskyy_v@yahoo.com).

**Удовицький Олександр Миколайович** — к.т.н., доцент, доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів; e-mail: <https://orcid.org/0000-0003-2234-806X>, [o.udvytskyi@nltu.edu.ua](mailto:o.udvytskyi@nltu.edu.ua).

**Копинець Зоя Павлівна** — к.т.н., доцент, доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів; <https://orcid.org/0000-0001-8977-6953>, [zoja2006@ukr.net](mailto:zoja2006@ukr.net).

**Удовицька Мар'яна Володимирівна** — здобувач кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів; <https://orcid.org/0009-0007-1510-7248>, [udovytskam@gmail.com](mailto:udovytskam@gmail.com).

**Манзюк Андрій Олександрович** — аспірант кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів, <https://orcid.org/0009-0007-2609-9036>, [manziuk.andrii@nltu.lviv.ua](mailto:manziuk.andrii@nltu.lviv.ua).

Національний лісотехнічний університет України.

**V. O. Mayevskyy**  
**O. M. Udovyttskyi**  
**Z. P. Kopynets**  
**M. V. Udovytyska**  
**A. O. Manzyuk**

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRENGTH OF WOODEN GLUED BEAMS WITH WOOD DEFECTS

Ukrainian National Forestry University

*The article investigates the influence of natural wood defects and imperfections in finger joints on the strength and modulus of elasticity of glued laminated timber beams of the strength class C24 (KVH). The relevance of the topic is due to the widespread use of such beams in modern construction as environmentally friendly, energy-efficient and durable load-bearing structures. The aim of the work was to determine the actual strength characteristics of KVH beams made of spruce wood at the production facilities of Milwood LLC, to evaluate the effectiveness of the current technological process, and to develop practical recommendations for its improvement.*

*The results of experimental tests of ten glued laminated timber beams samples for bending and determining the modulus of elasticity showed that, despite the generally high average strength values, there is significant variability in the results obtained. The coefficient of variation of the elastic modulus exceeded 10%, and the coefficient of variation of bending strength reached about 12%.*

*It has been established that the most critical defects leading to premature destruction of beams are the presence of knots (especially in the tension zone), the emergence of the core on the surface of the lumber, as well as insufficient gluing quality at the dowel joints. These factors often cause delamination or detachment along the glue joint, which significantly reduces the load-bearing capacity of the structure. In most cases, the onset of destruction of the glued laminated timber beams was observed precisely in areas with a concentration of defects or violations of the technological parameters of gluing.*

*The obtained results confirm the need to strengthen the quality control system for raw wood and production processes. In particular, it is recommended to improve the procedures for visual sorting of sawn timber, optimize cross-cutting to reduce the number of knots in critical areas, and improve the technology of glue application and the formation of adhesive joints between elements. The implementation of these measures will contribute to improving the uniformity of mechanical properties, reliability and durability of glued wooden structures.*

**Keywords:** structural beams, glued wood, wood defects, finger joint, modulus of elasticity, bending strength.

**Mayevskyy Volodymyr Olexandrovych** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Saw-milling, Joinery and Wooden Building Products, [orcid.org/0000-0001-5820-9454](https://orcid.org/0000-0001-5820-9454), [mayevskyy\\_v@yahoo.com](mailto:mayevskyy_v@yahoo.com).

**Udovyttskyi Olexandr Mykolaiovych** — Cand. Sc., Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Saw-milling, Joinery and Wooden Building Products; e-mail: [orcid.org/0000-0003-2234-806X](https://orcid.org/0000-0003-2234-806X), [o.udvytskyi@nltu.edu.ua](mailto:o.udvytskyi@nltu.edu.ua).

**Kopynets Zoya Pavlovna** — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Saw-milling, Joinery and Wooden Building Products; [orcid.org/0000-0001-8977-6953](https://orcid.org/0000-0001-8977-6953), [zoja2006@ukr.net](mailto:zoja2006@ukr.net).

**Udovytyska Mariana Volodymyrivna** — Post-Graduate Student the Chair of Saw-milling, Joinery and Wooden Building Products; <https://orcid.org/0009-0007-1510-7248>, [udovytskam@gmail.com](mailto:udovytskam@gmail.com).

**Manzyuk Andriy Olexandrovych** — Post-Graduate Student the Chair of Saw-milling, Joinery and Wooden Building Products, [orcid.org/0009-0007-2609-9036](https://orcid.org/0009-0007-2609-9036), [manziuk.andrii@nltu.lviv.ua](mailto:manziuk.andrii@nltu.lviv.ua). Ukrainian National Forestry University.