

ТОРЦІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛКОК: ВПЛИВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ

ENDS OF WOODEN BEAMS: IMPACT ON LOAD-BEARING CAPACITY AND DEFORMABILITY

Клемко І.А., аспірант, [https:// orcid. Org / 0009- 0002 -5892 - 4866](https://orcid.org/0009-0002-5892-4866), Фамуляк Ю.Є., к.т.н., доцент <https://orcid.org/0000-0003-3044-5513>, (Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Львів)

Klemko I., graduate student , <https://orcid.org/0009-0002-5892-4866>, Famulyak Yu., candidate of technical sciences, associate professor, <https://orcid.org/0000-0003-3044-5513>(Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv)

У статті розглядається сучасний підходи до відновлення торців дерев'яних балок, уражених гниттям, без повного демонтажу конструкцій. Основну увагу приділено методам локального підсилення зруйнованих торців за допомогою вклеєних сталевих стрижнів на епоксидних клеях, що забезпечують відновлення несучої здатності балки. Також описано основні сучасні методи підсилення торців деревини. Описано типові етапи відновлення, включаючи підготовку основи, нарощування нової частини деревини та встановлення арматурних стрижнів. В статті наведені конструктивні схеми та приклади практичної реалізації.

Ends are fundamental elements of building structures designed to transfer loads from beams to columns, walls, or foundations. Their main function is to provide stable support for horizontal structural elements such as glued beams, floor beams, or frame beams, which take vertical loads and then effectively distribute them to the supporting structure. These connections are critical because they are points of stress concentration and potential failure if not properly designed or executed. Reliable connections are essential for maintaining the overall stability of the structure and play an important role in ensuring that the load-bearing capacity of wood is fully utilized. Wood, as a building material, is becoming increasingly relevant in modern construction due to its environmental friendliness, renewability, and aesthetic qualities. However, its widespread use in large-span and heavy-load structures has traditionally been limited by certain mechanical properties, such as anisotropy, which leads to significant differences in strength and stiffness depending on the

direction of the load relative to the grain. The behavior of wood in load-bearing areas is problematic due to its low compressive and tensile strength perpendicular to the grain, which can lead to local damage or splitting. Solving these problems is a critical task for the wood construction industry. This will improve the reliability and safety of wooden structures, optimize the use of materials, reduce their cost, and ensure the durability of buildings. Improving design methods in support areas, especially through the development and implementation of unified, physically based models, will allow engineers to more accurately calculate load-bearing capacity and deformability, which is the basis for effective and sustainable timber construction in the modern world. One possible solution to this problem is to install end stops, which would significantly strengthen the support node of wooden structural elements during exploitation.

Ключові слова: торець, дерев'яні балки, гниття, підсилення, клейові з'єднання, несуча здатність
end grain, wooden beams, rot, reinforcement, adhesive joints, load-bearing capacity.

Вступ. Торці є фундаментальними елементами будівельних конструкцій, призначеними для передачі навантажень від балок до колон, стін або фундаментів. Їхня основна функція полягає у забезпеченні стабільної опори для горизонтальних конструктивних елементів, таких як клеєні балки, балки перекриття чи каркасні балки, які приймають вертикальні навантаження та надалі ефективно розподіляють їх на несучу конструкцію. Ці з'єднання мають вирішальне значення, оскільки вони є точками концентрації напружень та потенційного руйнування, якщо їх неправильно спроектувати чи виконати. Надійні з'єднання є суттєвими для підтримки загальної стабільності конструкції, вони відіграють важливу роль у забезпеченні повного використання несучої здатності деревини.

Постановка проблеми. Деревина, як будівельний матеріал, набуває все більшої актуальності у сучасному будівництві завдяки своїй екологічності, відновлюваності та естетичним якостям. Проте, її широке застосування у великопролітних та високонавантажених конструкціях традиційно обмежується певними механічними властивостями, наприклад анізотропією, що призводить до значної різниці у міцності та жорсткості залежно від напрямку прикладання навантаження відносно волокон [2].

Особливо вразливими зонами в дерев'яних балках є їх торці (опорні вузли), які відповідають за ефективну передачу навантажень від балки до несучих елементів, таких як колони, стіни або фундаменти [7]. Саме в цих зонах концентруються напруження, і вони є критичними точками потенційного руйнування, якщо їх неправильно спроектувати чи виконати [2].

Поведінка деревини в опорних зонах є проблемною через її низьку міцність на стиск та розтяг перпендикулярно волокнам, що може призвести до

локальних руйнувань або розколів. Додатково, складний розподіл дотичних напружень та вплив вологості й повзучості ускладнюють прогнозування довгострокової поведінки та несучої здатності [3, 4, 7].

Вирішення цих проблем є критично важливим завданням для галузі будівництва з деревини. Це дозволить підвищити надійність та безпеку дерев'яних конструкцій, оптимізувати використання матеріалів, зменшити їхню вартість та забезпечити довговічність споруд. Удосконалення методів проектування в опорних зонах, особливо через розробку та впровадження уніфікованих, фізично обґрунтованих моделей, дозволить інженерам точніше розраховувати несучу здатність та деформативність, що є основою для ефективного та стійкого дерев'яного будівництва в сучасному світі. Одним з можливих варіантів вирішення цього завдання є встановлення торцевих упорів, які значно б підсилили опорний вузол дерев'яних конструктивних елементів в процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень. Публікації з цієї тематики висвітлюють як експериментальні так і теоретичні аспекти несучої здатності та деформативності торців дерев'яних балок. Проблемами дерев'яних конструкцій у вітчизняному просторі займаються С.С. Гомон [2], Б.Г. Демчина, Д.В. Михайловський, М.І. Сурмай, В. М. Попельнух [9] та інші. Також було проаналізовано дослідження закордонних авторів таких як S. Franke [3], B. Franke [3], A.M. Harte [3], Leijten [8], S. Thelandersson [7] та інші. Згідно аналізу останніх наукових джерел можна виділити такі основні характеристики:

- ✓ фундаментальні основи та особливості конструювання елементів з дерева, які актуальні і сьогодні, а також широкі властивості деревини [2, 7, 9];
- ✓ сучасні основні положення щодо проектування дерев'яних конструкцій на території України [5];
- ✓ детальний опис торців клеєного бруса, акцентуючи увагу на передачі навантажень та захисту від вологи належним чином [1, 10];
- ✓ методи та засоби підсилення торців дерев'яних балок [1, 3, 7];
- ✓ ряд публікацій які охоплюють дослідження на стиск перпендикулярно волокнам, режими руйнування та сучасні методів підсилення дерев'яних балок [3, 8].

Постановка мети і задач досліджень. Основною метою даного дослідження є всебічний аналіз та систематизація знань щодо несучої здатності та деформативності торців дерев'яних балок, а також розробка науково обґрунтованих рекомендацій для їх подальшого ефективного проектування та посилення з урахуванням специфіки матеріалу та сучасних технологій, а також можливості використання торцевих упорів таких балок для підвищення їх міцнісних характеристик.

Методика досліджень та їх результати. Деревина поєднує в собі статус найдавнішого, сучасного та перспективного будівельного матеріалу. Це унікальний матеріал, який відновлюється в природі [9]. Серед важливих

переваг дерев'яних конструкцій – мінімальні енерговитрати на їх виробництво, а також екологічно безпечна утилізація відходів деревообробки та деревини після завершення експлуатації конструкцій і споруд, що не шкодить довкіллю [2].

Дерев'яні конструкції впевнено займають одне з провідних місць серед легких будівельних конструкцій. Однак існують об'єктивні причини, що стримують їх широке застосування, через недостатню надійність і довговічність, так і наявність як природних (сучки, тріщини та ін.), так і технологічних дефектів [3].

З'єднання є важливими елементами дерев'яних конструкцій. Через те, що для їх створення часто виконуються отвори та врізки, їх переріз послаблюється, що призводить до підвищеної деформативності. Як правило, руйнування дерев'яних конструкцій розпочинається саме в з'єднаннях. Непередбачувані збільшення прогинів дерев'яних конструкцій також пояснюються деформативністю з'єднань. Через свою анізотропну структуру та відносно низьку міцність при розтягу чи стиску поперек волокон, деревина може створювати певні складності в момент проєктування таких з'єднань [2, 3, 7, 8]. Саме ці властивості створюють надзвичайну складність та різноманітність рішень, необхідних для ефективного з'єднання дерев'яних елементів у конструкціях. Отже, міцність і деформативність усієї конструкції залежать від коректних умов проєктування, розрахунку та виготовлення з'єднань. Значну складність і велику кількість різних видів з'єднань у дерев'яних конструкціях спричиняє анізотропічна будова деревини, а також її низька міцність при розтягу чи стиску поперек волокон [2].

В минулому деревина була матеріалом, який використовувався переважно для будівництва горизонтальних несучих конструкцій практично для всіх типів будівель. Це відносно високоміцний матеріал сам по собі, і відомо, що з плином часу це призводить до зниження його несучої здатності [10]. Основною причиною цього є те, що деревина є біологічним матеріалом, отже вона природним чином піддається гниттю, якщо не вжити певних запобіжних заходів для її збереження. На жаль, така ситуація часто зустрічається у старих будівлях. Люди, які займаються реставрацією стародавніх конструкцій точно стикалися з гниттям дерев'яних елементів. Більшість цих «хвороб» зосереджені на торцях балок (рис. 1), часто в безпосередньому контакті з цегляним муром, тоді як решта елемента загалом знаходиться в доброму стані [10]. .



Рис. 1. Пошкодженні торцеві елементи балок історичних будівель [10].

Розглянемо метод ремонту торців балки за допомогою клеїв та сталеві арматури [10]. Автори статті зазначають, що наведені нижче методи слід розглядати лише як приклад. Згідно з новішою орієнтацією та для того, щоб зробити втручання якомога менш нав'язливими, з'єднувальні елементи обмежуються чотирма кутами балки, а їхня довжина зменшується до необхідного мінімуму. Було застосовано вклеєні стрижні, які насаджувались і з'єднували основну частину балки з нарощеною частиною, автори дотримувались норм Eurocode 5. Нижче наведено покроковий опис процесу щодо підсилення торцевого елемента балки:

- демонтаж балки;
- видалення гнилої частини деревини, використовуючи зріз під кутом (рис. 2);
- заміна гнилої частини деревини новим елементом, сформованим таким чином, щоб зовнішні розміри були однаковими (рис. 3);
- підготовка внутрішніх отворів оригінальної балки та нарощуваної частини для розташування з'єднувальних елементів (рис. 4);
- нанесення клею в отвори (було використано тиксотропний клей) та введення з'єднувальних елементів всередину отворів (рис. 5);
- вставка додаткових дерев'яних елементів, які приховують пази (рис. 6);
- монтаж готової підсиленої балки на початкове місце (рис. 7).

Аналіз показує, що торці дерев'яних конструкцій є дуже чутливими до зовнішніх умов середовища. А підсилення їх несучої здатності вимагає ретельного підходу, з урахуванням усіх можливих аспектів. Розрахунок навантаження для торця дерев'яної балки є важливим елементом при проєктуванні, адже слід зважати на величину сил, які будуть діяти на цю зону. Наприклад, для хвойної деревини класу міцності С30 стиск чи розтяг вздовж балки, відповідає достатньо високим значенням відносно дії сил поперек балки [2]. Також зсув та кручення показують низький рівень міцності. Нижче у таблиці наведено ключові характеристики поведінки торців і вплив на несучу здатність та деформативність (Таблиця 1). Ці дані чудово показують місця, де

при дії тих чи інших сил можуть відбуватись руйнування і для яких механічних навантажень потрібно приділяти особливу увагу.



Рис. 2. Видалення гнилої частини.



Рис. 3. Підготовка нової частини до наросування



Рис. 4. Підготовка внутрішніх отворів



Рис. 5. Нанесення клею в отвори



Рис. 6. Вставка додаткових дерев'яних елементів



Рис. 7. Відремонтована балка

Таблиця 1.

Характеристичні значення міцності, жорсткості та щільності для хвойної деревини класів міцності С30 (EN 338.2009) [2].

Механічна дія (клас міцності С30)	Значення міцності (Н/мм ²)	Ключові характеристики поведінки для торців	Вплив на несучу здатність та деформативність торців
Стиск вздовж	23	Висока міцність, але потрібно враховувати значення жорсткості для тонких виробів	Вплив незначний адже значення міцності має досить високі показники
Стиск поперек	2,7	Низька міцність. Волокна деревини дуже легко руйнуються під дією поперечного тиску	Вплив високий, адже міцність в цій зоні в 9 разів менша ніж при стиску вздовж
Розтяг вздовж	18	Високий рівень міцності	Вплив незначний
Розтяг поперек	0,4	Низький рівень міцності, викликає руйнування деревини	Вплив високий, може викликати розколи
Зсув та кручення	2	Низький рівень міцності. Викликає тангенціальні напруження	Вплив високий, сильні напруження поблизу торцевих упор викликають руйнування пов'язані з слабкими з'єднаннями

У прикладі підсилення і відновлення несучої здатності торця дерев'яної балки, який було розглянуто раніше [10], використано метод протезування (нарощування). Це один з передових методів для відновлення чи підсилення несучої здатності балки. Зокрема існують і інші засоби та методи, які використовуються для таких завдань. Один з яких це підсилення завдяки

використанню армованого волокнами композитного матеріалу Fiber Reinforced Polymer (FRP) [4]. Це можуть бути як, полімери армовані вуглецевим волокном (CFRP), так і армовані скловолкном (GFRP) та інші. Методи їх кріплення можуть бути різноманітними, де листи приклеюються до зовнішньої поверхні балки; вклеюються як стрижні або листи; вставляються у пази, тощо. Посилення композитними матеріалами значно покращує несучу здатність, жорсткість, пластичність дерев'яних елементів, особливо в розтягнутих зонах, де деревина слабка. Але незважаючи на значні переваги, застосування композитних матеріалів досі потребує експериментальних досліджень. Існує дефіцит встановлених норм та посібників із застосуванням FRP для підсилення структури деревини. Також є нестача досвіду відносно довгострокової експлуатації FRP елементів. Вартість деяких композитних матеріалів (наприклад CFRP) може бути високою у порівнянні зі сталлю.

Сталеві профілі U-подібної форми, швелери, листи сталі теж часто використовуються для посилення дерев'яних балок. Їх можна кріпити гвинтами, болтами чи клеєм. Металеві підсилення можуть бути спроектовані як торцеві протези (що опираються на несучу зону і затискають балку) або як проміжний протез (для довгих зон балки, які необхідно підсилити) [7]. Вклеєні металеві стрижні в дерев'яні елементи за допомогою двокомпонентних або поліуретанових клеїв, переважно призначені для з'єднування несучих елементів. Як правило це, дерево – дерево, дерево – бетон, дерево – метал. Різьбові металеві стрижні вважаються чудовим способом посилення проти напружень розтягу поперек волокон. Вони створюють з'єднувальну силу, зменшуючи дотичні напруження в деревині, та викликають корисне стиснення поперек волокон деревини, що збільшує несучу здатність [9].

Дерев'яні протези (нарощування) цей метод передбачає заміну пошкоджених елементів деревини новим цілісним куском (пиломатеріал, клеєний брус, крос-ламінована деревина), які з'єднуються з рештою деревини за допомогою клею і стрижнів. Елемент деревини, який буде насаджуватись повинен бути тієї ж або подібної породи деревини для того щоб відповідати його механічним властивостям та вмістом вологи. Недоліком цього методу може бути великий обсяг ручної праці, столярної роботи, щоб попередньо сформувати майбутній протез. З економічної точки зору не рекомендується використовувати цей метод, якщо втрачено більше 1/3 частини основного елемента [10].

Вибір методу підсилення балки є критично важливим рішенням для інженерів, тому що сучасні матеріали пропонують широкий спектр вирішення різноманітних проблем з несучою здатністю, але їхнє практичне застосування

не визначено регуляторними нормами, немає достатнього обсягу даних щодо довговічності цих матеріалів та специфічних умов руйнування. Просте у реалізації металеве підсилення, хоча потенційно менш «високотехнологічне», проте може пропонувати більш передбачувану поведінку та встановлені регуляторні норм з проектування [5]. Вибір методу стосується не лише максимізації несучої здатності, а і вартістю, технологічністю та відповідністю нормативним вимогам. Це підкреслює, що «оптимальне» проектування є багатоцільовою проблемою.

Основні проблеми, пов'язані з поведінкою деревини в опорних зонах, включають:

1. Низька міцність на стиск поперек волокон: деревина значно гірше сприймає стискаючі зусилля, прикладені поперек волокон, порівняно з поздовжнім напрямком, що може призвести до локального руйнування або надмірних деформацій в опорних зонах.

2. Вразливість до розтягу поперек волокон: деревина має мінімальну здатність протистояти розтягу поперек волокон, що може викликати крихкі, непластичні руйнування (розколи) практично миттєво.

3. Складний розподіл дотичних напружень: розподіл дотичних напружень поблизу опор значно відхиляється від простих теоретичних моделей, а максимальні дотичні напруження можуть бути значно вищими, ніж передбачається. Це може призвести до руйнувань, пов'язаних зі зсувом, які є крихкими та небажаними.

4. Вплив вологості та повзучості: зміни вмісту вологи викликають усадку та розширення деревини, що може призвести до ослаблення з'єднань або розтріскування. Крім того, повзучість деревини під тривалим навантаженням призводить до залежних від часу деформацій та перерозподілу напружень, що вимагає точного прогнозування для передбачення довгострокової поведінки.

Висновки. Аналіз підкреслює, що торці дерев'яних балок є дуже чутливими до специфічних режимів руйнування через властиву деревині анізотропію, зокрема її низьку стійкість до стиску та розтягу поперек волокон, а також складний розподіл дотичних напружень. Ці ділянки є критичними точками для структурної цілісності.

Подальші експериментальні дослідження, особливо для складних видів навантаження, різних порід деревини та різноманітних умов навколишнього середовища, є критично важливими для уточнення теоретичної бази, підвищення довіри до цих новітніх методів підсилення та розробку надійних стандартів проектування. І тому, важливим елементом посилення можуть виступати різного роду торцеві упори, які б забезпечували необхідну несучу здатність та експлуатаційну надійність дерев'яних конструктивних елементів.

Завдяки посиленню властивих деревині слабких сторін, ці інновації дозволяють ширше використовувати деревину у високоефективних,

довговічних конструкціях, що відповідає глобальним цілям екологічного розвитку та принципам економічної вигоди. Це позиціонує посилену деревину як ключовий компонент майбутніх стратегій зеленого будівництва, сприяючи перехід до більш екологічно відповідальних будівельних практик.

1. Engineered Wood Systems. Glulam Connection Details. – Form No. EWS T300H. – Tacoma, WA: APA – The Engineered Wood Association, 2007. – 4 с.

2. Гомон С. С. Конструкції із дерева та пластмас : навч. посіб. / С. С. Гомон. – Рівне : Національний університет водного господарства та природокористування, 2016. – 219 с.

Homon S. S. Konstruktsii iz dereva ta plastmas : navch. posib. / S. S. Homon. – Rivne : Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia, 2016. – 219 s.

3. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – Galway: National University of Ireland Galway, Timber Engineering Research Group, 2015. – 12 с.

4. Jian, B., Cheng, K., Li, H., Ashraf, M., Zheng, X., Dauletbek, A., Hosseini, M., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O., & Zhou, K. (2022). A Review on Strengthening of Timber Beams Using Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Renewable Materials*, 10(8), 1–26. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.021983>.

5. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Загальні положення, правила проектування та вимоги до конструкцій [Чинний від 2019-01-01]. – Київ: Мінрегіон України, 2017. – 112 с.

DBN V.2.6-161:2017. Dereviani konstruktsii. Zahalni polozhennia, pravyla proiektuvannia ta vymohy do konstruktsii [Chynnyi vid 2019-01-01]. – Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2017. – 112 s.

6. Будівельні конструкції. Теорія і практика: збірник наукових праць / гол. ред. О. Д. Журавський. – Вип. 7. – Київ: КНУБА, 2020. – 129 с. – DOI: 10.32347/2522-4182.7.

Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka: zbirnyk naukovykh prats / hol. red. O. D. Zhuravskiy. – Vyp. 7. – Kyiv: KNUBA, 2020. – 129 s. – DOI: 10.32347/2522-4182.7.

7. Thelandersson, S., Larsen, H. J. (ред.). Timber Engineering / S. Thelandersson, H. J. Larsen. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 427 с.

8. Vessby J., Enquist B., Olsson A. Compression perpendicular to grain in spruce: A review of selected experimental and numerical models. *Construction and Building Materials*, 105, 528-535. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.170>.

9. Попельнух В. М. Проектування дерев'яних конструкцій : навч. посіб. / Попельнух В. М. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 207с.

Popelnukh V. M. Proektuvannia derevianykh konstruktsii : navch. posib. / Popelnukh V. M. – Kharkiv: KhNAMH, 2008. – 207s.

10. Pizzo B., Schober K.-U. On-site interventions on decayed beam ends / *Lignovisionen. Bonding with Timber*. – 2008. – Вип. 18. – С. 40–49.