

Розділ 1

АНАЛІТИЧНІ ТА ЧИСЛОВІ МЕТОДИ В МЕХАНІЦІ ТА ФІЗИЦІ РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 624.01-691

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ ЗРОЩЕНИХ ЛАТ ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ДЛЯ ДАХОВИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДИНКІВ

С. Гайда, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0001-7468-5661

О. Удовиський, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0003-2234-806X

І. Рутковська, к. т. н.

ORCID ID: 0009-0009-9051-5086

Р. Салабай, к. т. н.

ORCID ID: 0009-0001-9820-652X

І. Салабай, к. т. н.

ORCID ID: 0009-0000-6219-9869

Національний лісотехнічний університет України

<https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.007>

Гайда С., Удовиський О., Рутковська І., Салабай Р., Салабай І. Побудова математичної моделі міцності зрощених лат із вживаної деревини для дахових конструкцій будинків

Досліджено міцність зрощених на зубчастий шип лат із вживаної деревини (ВЖД), які використовують у дахових конструкціях. Актуальність роботи зумовлена потребою у впровадженні ресурсоефективних технологій і розвитку циркулярної економіки у будівництві. Розглянуто проблему нерівномірності фізико-механічних властивостей вторинної деревини, яка ускладнює прогнозування її експлуатаційних характеристик. Для кількісного опису впливу основних геометричних параметрів (ширини лати B і довжини шипа L) на межу міцності при статичному згині проведено експериментальні випробування зразків і побудовано двофакторну регресійну модель другого порядку. Модель показала статистично значущий вплив обох факторів і підтвердила наявність синергетичного ефекту: підвищення міцності спостерігається при одночасному збільшенні ширини лати та довжини шипа. Оптимальні параметри, що забезпечують максимальну межу міцності (79,83 МПа), становлять $B=64$ мм та $L=24$ мм. Доведено, що навіть при використанні ВЖД можна отримати елементи з міцністю понад 70 МПа, що відповідає нормативним вимогам до несучих дахових елементів. Практична значущість полягає у можливості використання отриманої моделі для оптимізації технологічних процесів зрощування, раціонального використання вторинної сировини та зниження собівартості виробів. Запропоновані рекомендації щодо вибору ширини лати (56–64 мм) та довжини шипа (18–24 мм) можуть бути впроваджені у виробничі стандарти, технічні умови та технологічні карти для підприємств деревообробної галузі. Результати дослідження сприяють розвитку ресурсоефективних методів у дерев'яному будівництві, зменшенню екологічного навантаження та формуванню наукової основи для подальших досліджень довговічності таких з'єднань.

Ключові слова: вживана деревина, зубчасте з'єднання, міцність при статичному згині, дахові конструкції, регресійна модель, циркулярна економіка, оптимізація параметрів.

Haida S., Udovyt'skyi O., Rutkovska I., Salabai R., Salabai I. Developing a mathematical model to determine the strength of spliced laths made from post-consumer wood for roof structures in buildings

The article presents a study on the bending strength of finger-jointed laths made from reused wood (RW) for roof structural applications. The relevance of this research lies in promoting resource-efficient technologies and the principles of the circular economy in construction. The variability of mechanical properties in secondary timber creates challenges in predicting its strength performance. To quantify the influence of geometric parameters – lath width (B) and finger length (L) – on bending strength, experimental tests were performed, and a second-order two-factor regression model was developed. The model revealed a statistically significant effect of both factors and confirmed a synergistic interaction: the bending strength increases when both width and finger length grow simultaneously. The optimal parameters achieving maximum strength (79.83 MPa) are $B=64$ mm and $L=24$ mm. It was demonstrated that reused wood can be effectively transformed into full-length structural elements with strength exceeding 70 MPa, meeting the normative requirements for roof load-bearing members.

The practical significance of the study lies in enabling optimization of production parameters for finger-jointed elements, improving material utilization efficiency, and reducing production costs. The recommended parameter ranges – lath width 56–64 mm and finger length 18–24 mm – can be applied in manufacturing standards, technical specifications, and process charts for the woodworking industry. The results contribute to sustainable and resource-efficient timber construction, reducing environmental impact and establishing a foundation for further studies on the durability and long-term performance of reused-wood joints.

Keywords: reused wood, finger joint, bending strength, roof structures, regression model, circular economy, parameter optimization.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції у будівництві передбачають широке впровадження ресурсоефективних технологій та повторне використання матеріалів у межах концепції циркулярної економіки. Деревина, що вже була у вжитку, – вживана деревина (ВЖД), а також розмірно-придатні залишки основного виробництва, становлять значний резерв сировини для виготовлення конструктивних елементів [6; 12; 26]. Особливо це стосується дахових конструкцій, де потрібні елементи з високою міцністю при статичному згині. Зрошення на зубчастий шип дозволяє формувати повноцінні елементи необхідної довжини з коротких відрізків, зменшуючи втрати деревини та підвищуючи економічну доцільність виробництва.

Дослідження параметрів зубчастого з'єднання в деревині проводять протягом останніх десятиліть. Нормативна база [1–5] визначає основні вимоги до геометрії зубчастих шипів і механічних випробувань. Попередні наукові праці підтверджують вплив довжини шипа та ширини елемента на показники міцності при згині, проте більшість досліджень виконані для первинної деревини. Значно менше уваги приділено вторинній деревині та виробничим залишкам, які мають варіативні фізико-механічні властивості та нерівномірність структури. Водночас методи математичного моделювання та регресійного аналізу дозволяють створити надійні прогностичні моделі міцності, що можуть бути застосовані до нетипових категорій сировини.

Незважаючи на наявність досліджень із параметрів зубчастих з'єднань, досі відсутні математичні моделі, що описують міцність при статичному згині зрошених лат саме з ВЖД та залишків основного виробництва. Недостатньо вивчено поєднаний вплив ширини лати та довжини шипа на міцність таких елементів, а також оптимальні діапазони їхніх значень для отримання якісних дахових конструкцій. Це створює науково-практичну прогалину, яка гальмує впровадження вторинної деревини у відповідальні будівельні конструкції. Тому розроблення та верифікація двофакторної математичної моделі міцності є актуальним завданням, що має як наукове, так і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Використання ВЖД відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку, оскільки зменшує потребу у заготівлі нової сировини й, відповідно, знижує рівень вирубування лісів [20; 23]. Повторне застосування деревини дозволяє зменшити обсяги відходів, що надходять на полігони, і знизити викиди CO₂, пов'язані з виробництвом нових матеріалів [9; 14; 19]. У літературі йдеться, що повторне використання деревини має значно нижчий «вуглецевий слід» порівняно з виробництвом цементу, сталі чи полімерних матеріалів, що робить її одним із ключових матеріалів для низьковуглецевого будівництва [6; 14; 20; 23].

Дослідження показують, що повторне використання деревини дозволяє суттєво знизити собівартість будівельних елементів завдяки залученню вторинної сировини та скороченню витрат на утилізацію [6; 12; 17]. Залишки основного виробництва та ВЖД, що зазнала розбирання, можуть бути перероблені у конструктивні елементи з прийнятними характеристиками, що сприяє підвищенню ефективності деревообробних підприємств [11–14]. Економічна ефективність зростає також за рахунок використання відрізків, які у звичайних умовах є відходами, але при зрошенні за відповідними технологіями [17; 18] набувають доданої вартості [7; 15; 16; 18].

Літературні джерела вказують, що ВЖД має змінні фізико-механічні властивості через попередні експлуатаційні умови, однак за правильного сортування, сушіння та механічної обробки [11; 13] вона може забезпечувати достатню міцність для несучих конструкцій [7; 10; 14; 21]. Найбільш перспективним методом є зрошення короткомірних елементів на зубчастий шип, що дозволяє отримати повномірні конструктивні елементи з прогнозованими властивостями [7; 15; 18]. При цьому важливим завданням залишається оптимізація геометрії з'єднань (довжини зуба, ширини елемента) для досягнення необхідних показників міцності при згині [11]. У наукових працях наголошено, що саме дослідження параметрів з'єднань із ВЖД досі недостатньо розвинене порівняно з вивченням нової деревини [7].

Як показав аналіз наукових досліджень щодо зрощування дерев'яних брускових елементів на зубчастий шип для отримання міцних заготовок, то тут розглянуто питання тонкомірних заготовок, що використовуються для виготовлення складових елементів ґратчастих меблів [7; 8].

Отож, повторне використання деревини має багатомірну актуальність: воно одночасно відповідає екологічним викликам, забезпечує економічну доцільність, має значний технічний потенціал і створює соціальні переваги [22; 24; 25]. Проте залишаються не вирішеними питання оптимізації параметрів зубчастих з'єднань із вторинної сировини, що визначає напрям подальших досліджень. Тобто варто для проведення експериментів застосувати план другого порядку, квадратичну модель із взаємодією та перевіркою адекватності.

Постановка завдання. Збільшення ширини лати B та довжини шипа L підвищує міцність при згині до певного оптимуму, після чого спостерігається зниження (стабілізація) через концентрації напружень і геометричну нестабільність; є статистично значуща взаємодія $B \times L$; лати із вживаної деревини та розмірно-придатних залишків, за правильного добору B , L можуть забезпечити міцність, не гіршу за традиційні аналоги з первинної деревини для дахових застосувань.

Наше завдання – розробити математичну модель міцності при статичному згині зрощених на зубчастий шип лат із ВЖД та розмірно-придатних відходів основного виробництва залежно від двох факторів: ширини лати та довжини зубчастого шипа, для визначення комбінацій, що забезпечують отримання міцних елементів дахових конструкцій.

Об'єкт дослідження – зрощені на зубчастий шип дерев'яні лати, виготовлені із вживаної деревини та розмірно-придатних залишків основного виробництва, що працюють на статичний згин.

Предмет дослідження – вплив геометричних параметрів елемента (ширини лати B) та з'єднання (довжини зубчастого шипа L) на показники міцності при статичному згині й відповідна регресійна модель $Y = f(B, L)$.

Виклад основного матеріалу. Сформуємо вибірку брусків із вживаної деревини та виробничих залишків, виконавши зрощення на зубчастий шип із рівнями $L = (12, 18, 24)$ мм та виготовимо зразки трьох ширин $B = (48, 56, 64)$ мм. Здійснимо статичні випробування на статичний згин для запланованих комбінацій змінних факторів; побудуємо регресійну квадратичну модель та перевіримо її на адекватність; оцінимо взаємодію факторів B та L на міцність; визначимо раціональні типорозміри зубчастих з'єднань (ширина лати та довжина шипа), що забезпечують досягнення нормативних показників міцності.

Загальна методика досліджень передбачає: заготівлю; очищення; технологічні операції з виготовлення та зрощування елементів товщиною 40 мм; випробування для визначення міцності при статичному згині. Для вирішення поставлених завдань досліджень використано план другого порядку, який дозволяє отримати математичний опис об'єкта у вигляді поліному другого порядку. Змінними факторами для зрощених елементів із ВЖД були ширини брусків 48, 56, 64 мм (B) та довжина зубчастих шипів в брусках 12, 18, 24 мм (L). (табл. 1).

Виготовлено експериментальні зрощені елементи із ВЖД ялини для подальшого дослідження та порівняльного аналізу шляхом випробування на межу міцності при статичному згині. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини розмірно-придатних брусків з ялини $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів у брусках $L(x_2)$.

Таблиця 1

Матриця В-плану для двох змінних факторів

№ дослідів	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	B	L	x_1	x_2
ПФП 2^k	48	12	-1	-1
	64	12	1	-1
	48	24	-1	1
	64	24	1	1
Зіркові точки	48	18	-1	0
	64	18	1	0
	56	12	0	-1
	56	24	0	1

Одержана математична модель – рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів – має вигляд:

$$y = 68,62 + 6,645x_1 + 4,501x_2 - 0,905x_1^2 - 0,127x_2^2 + 1,099x_1x_2.$$

Запис математичної моделі – рівняння регресії в натуральних значеннях змінних факторів – такий:

$$\sigma_u = -13,8 + 2,002 B - 0,4051 L - 0,0141 B^2 - 0,00353 L^2 + 0,0229 B L.$$

З'ясовано, що ширина розмірно-придатних брусків та довжини зубчастих шипів у брусках у конструкції заготовки із ВЖД ялини суттєво впливає на межу міцності під час згину σ_u . Обидва змінних фактори впливають прямопропорційно. Перевірка в центрі плану ($B = 56$, $L = 18$) $y = 68,62$ МПа – збігається з оригінальною моделлю. Інтерпретація – на рис. 1, 2.

Аналіз впливу довжини зубчастого шипа L показує, що для фіксованої ширини B спостерігається зростання міцності зі збільшенням довжини шипа. Тобто для всіх ширин B крива має чітку тенденцію до зростання при збільшенні довжини шипа. Приріст при переході від $L = 12$ до $L = 24$:

- при $B = 48$: від 57,54 до 64,35 МПа (+6,81 МПа);
- при $B = 56$: від 63,99 до 72,99 МПа (+9,00 МПа);
- при $B = 64$: від 68,63 до 79,83 МПа (+11,20 МПа).

Аналіз впливу ширини лат B показує, що усі три криві ($L = 12, 18, 24$ мм) показують стійке зростання міцності при збільшенні ширини. Для кожної довжини шипа збільшення ширини лати суттєво підвищує міцність:

- при $L = 12$: 57,54 ($B = 48$) $\rightarrow$ 68,63 ($B = 64$), приріст +11,09 МПа,
- при $L = 18$: 61,07 ($B = 48$) $\rightarrow$ 74,36 ($B = 64$), приріст +13,29 МПа,
- при $L = 24$: 64,35 ($B = 48$) $\rightarrow$ 79,83 ($B = 64$), приріст +15,48 МПа.

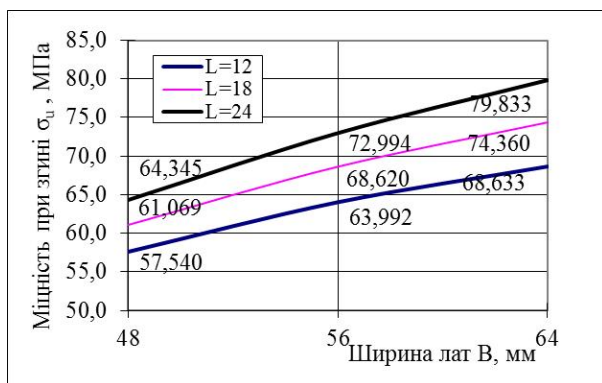


Рис. 1. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини брусків з ялини $B(x_1)$ у конструкції зрощених заготовок із ялини

Отже, чим більша довжина зуба, тим вища міцність. Ефект виражений у ширших латах. Ширина має навіть сильніший вплив, ніж довжина зуба, бо зростання перерізу зменшує концентрації напружень.

Аналіз впливу взаємодії факторів ($B \times L$) показує, що ефект від збільшення довжини шипа сильніший при більших ширинах. Вплив L посилюється зі зростанням B : при вузьких латах (48 мм) приріст міцності від довжини шипа невеликий (~7 МПа), а при широких (64 мм) – значно більший (~11 МПа). Це доводить наявність синергетичного ефекту: оптимальна робота з'єднання досягається тоді, коли одночасно зростають і ширина, і довжина шипа. Отож, обидва фактори мають істотний позитивний вплив на міцність, але ширина лати B є домінуючим чинником. Найвищий результат (79,83 МПа) отримано при $B = 64$ мм і $L = 24$ мм. Для вузьких лат ($B = 48$ мм) навіть збільшення довжини зуба не забезпечує такого рівня міцності, як для ширших. Тобто, для виготовлення надійних лат у дахових конструкціях оптимальним є поєднання ширини 56–64 мм та довжини шипа 18–24 мм.

За результатами експерименту здійснено оптимізацію ширини розмірно-придатних брусків із ялини $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів у брусках $L(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 79,83$ МПа можна отримати, зафіксувавши розмірні параметри ширини брусків із ялини $B(x_1) = 64$ мм та довжини зубчастих шипів у брусках $L(x_2) = 24$ мм (рис. 3).

Отримані експериментальні результати підтвердили статистично значущий вплив ширини брусків (B) та довжини зубчастого шипа (L) на межу міцності при статичному згині зрощених елементів. Усі варіанти досліджень демонструють монотонне зростання міцності зі збільшенням як ширини, так і довжини шипа. Це узгоджується з фізичною природою процесу: збільшення перерізу зменшує питомі напруження, а подовження шипа розширює площу ефективного склеювання, що підвищує здатність елемента протидіяти руйнуванню. Перспективним є вивчення довговічності таких з'єднань у реальних умовах експлуатації (цикли «вологість–сушіння», морозостійкість, втома). Також важливим напрямом є розробка методів неруйнівного контролю для оперативної оцінки якості вживаної деревини перед зрощенням.

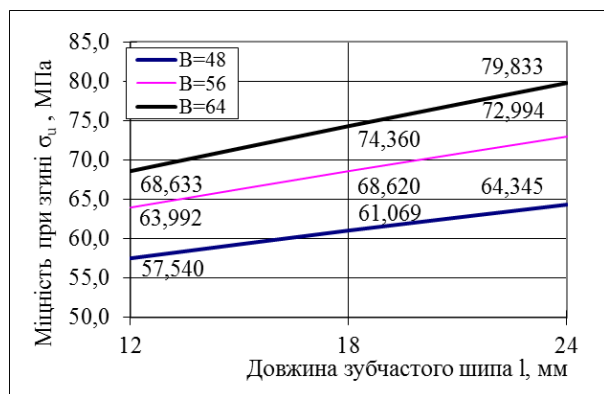


Рис. 2. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від довжини зубчастих шипів у брусках L (x_2) у конструкції зрощених заготовок із ялини

Наукова новизна. Вперше побудовано двофакторну математичну модель міцності при статичному згині зрощених на зубчастий шип лат із ВЖД з урахуванням ширини бруска та довжини зубчастого шипа. Кількісно визначено внесок кожного фактора та їхньої взаємодії у формування межі міцності. Встановлено, що ширина лати є домінуючим фактором, але її ефективність посилюється із збільшенням довжини зубчастого шипа. Виявлено синергетичний ефект: вплив збільшення довжини шипа є більш суттєвим при ширших брусках, що підтверджено статистично значущим коефіцієнтом взаємодії у регресійній моделі. Показано можливість використання ВЖД та короткомірних відрізків для виготовлення повноцінних несучих елементів дахових конструкцій без зниження експлуатаційних властивостей за умови оптимального добору параметрів з'єднання. Запропонована модель у натуральних змінних може бути використана для прогнозування міцності та оптимізації технологічних параметрів виробництва.

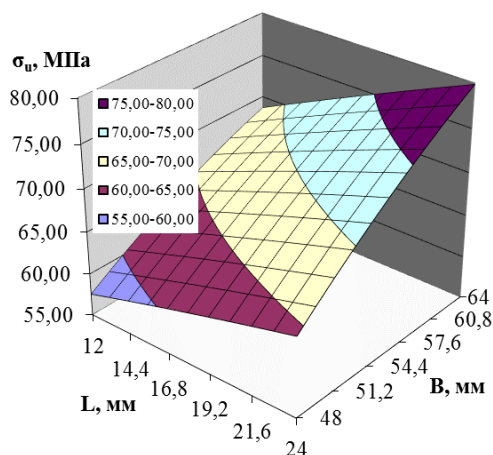


Рис. 3. Графічна залежність $\sigma_u = f(B(x_1), L(x_2))$

Отримані результати дозволяють виробничим підприємствам раціонально використовувати короткомірні відрізки та ВЖД, знижуючи відходи й собівартість продукції. Сформовано рекомендації щодо оптимальних параметрів ширини лат (56–64 мм) і довжини зубчастого шипа (18–24 мм), які забезпечують досягнення нормативних показників міцності для дахових конструкцій. Запропонована регресійна модель може бути застосована для створення довідкових таблиць, номограм чи програмного забезпечення для швидкого розрахунку несучої здатності зрощених елементів. Результати можуть бути використані при розробці технічних умов і стандартів для виробництва лат з ВЖД та залишків основного виробництва. Практичне впровадження дослідження сприяє підвищенню ресурсоефективності деревообробної галузі, зменшенню екологічного навантаження та забезпеченню доступних за вартістю матеріалів для будівництва.

Висновки. Проведено експериментальні дослідження міцності при статичному згині зрощених на зубчастий шип лат із вживаної деревини та розмірно-придатних залишків основного виробництва. Встановлено, що межа міцності при статичному згині залежить від ширини бруска та довжини зубчастого шипа. Ширина лати є домінуючим фактором, що визначає рівень міцності: збільшення від 48 до 64 мм забезпечує приріст показників на 11–15 МПа залежно від довжини шипа. Довжина зубчастого шипа також істотно впливає на міцність: при зростанні від 12 до 24 мм спостерігається приріст 7–11 МПа, причому цей ефект більш виражений у ширших брусках. Виявлено синергетичний вплив факторів: оптимальне поєднання параметрів ($B = 56\text{--}64$ мм та $L = 18\text{--}24$ мм) забезпечує досягнення міцності понад 70 МПа, що відповідає нормативним вимогам до несучих елементів дахових конструкцій (EN 14081, ДСТУ Б В.2.6-161:2010). Побудована регресійна модель у натуральних змінних дозволяє прогнозувати міцність зрощених лат залежно від геометричних параметрів, що створює основу для подальшої оптимізації виробничих процесів. Практичне значення дослідження полягає у можливості ефективного залучення короткомірних відрізків та ВЖД до виробництва несучих елементів дахових конструкцій, що зменшує відходи, підвищує ресурсоефективність і знижує собівартість готової продукції.

Бібліографічний список

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-217:2016. Настанова з проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини. Київ: Мінрегіон України, 2016. 35 с.
2. ДСТУ EN 15497:2019. Деревина масивна будівельна з зубчастими з'єднаннями. Експлуатаційні вимоги та мінімальні вимоги щодо виготовлення. Київ: УкрНДНЦ, 2019.
3. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіон України, 2017. 117 с.
4. EN 385:2001. Finger jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements, 2001. 16 p.
5. EN 15497:2014. Structural finger jointed solid timber – Performance requirements and minimum production requirements, 2014.
6. Medvid L. V. Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2021. Vol. 47. P. 34–46. <https://doi.org/10.36930/42214706>.
7. Lesiv L. E., Gayda S. V., Salapak L. V. Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2024. Vol. 50. P. 16–28. <https://doi.org/10.36930/42245002>
8. Lesiv L. E., Gayda S. V. Building a strength model of spliced billets made from post-consumer fir wood. Proceedings of scientific conference (Kharkiv, October 7–8, 2024). 2024. P. 187–189.
9. Gayda S. V., Lesiv L. E. Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2023. Vol. 49. P. 33–47. <https://doi.org/10.36930/42234903>.
10. Gayda S. V., Lesiv L. E. A determination and comparison of properties of post-consumer wood of the basic conifers. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2019. Vol. 45. P. 39–46. <https://doi.org/10.36930/42194506>.
11. Gayda S. V., Kiyko O. A. Determining the regime parameters for the surface cleaning of post-consumer wood by a needle milling tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 5 (1 (107)). P. 89–97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
12. Gayda S. V., Ferents O. B. Comparative analysis of alternative technologies for wooden house construction. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2025. Vol. 51. P. 49–63. <https://doi.org/10.36930/42255104>
13. Gayda S. V. Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2017. Vol. 43. P. 5–20. <https://doi.org/10.36930/42174301>.
14. Gayda S. V. The technologies and recommendations for the use of post-consumer wood in wood processing. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2013. Vol. 39 (1). P. 48–67. <https://doi.org/10.36930/42133909>.
15. Gayda S. V. Promising technologies of longitudinal splicing. *Woodbusiness*. 2004. Vol. 2. P. 34–45.
16. Gayda S. V. Progressive technologies of longitudinal wood splicing. *Equipment and Tools for Professionals*. 2004. Vol. 5. P. 10–19.
17. Gayda S. V. Modern technologies of wooden house construction. *Woodbusiness*. 2003. Vol. 4. P. 33–44.
18. Gayda S. V. Modern technologies and equipment for splicing. *Woodbusiness*. 2005. Vol. 2. P. 32–41.
19. Gayda S. V. Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2015. Vol. 41. P. 39–49. <https://doi.org/10.36930/42154106>.
20. Gayda S. V. Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2024. Vol. 50. P. 4–15. <https://doi.org/10.36930/42245001>.
21. Kondratyuk S. Ya. Resistance of materials and structural mechanics of wooden structures. Kyiv: KNUBA, 2015.
22. Mykhailovskyy D., Komar M., Sklyarova T., Bondarchuk B. The use of glued and cross-glued timber in reconstruction and new construction. *Building structures. Theory and practice*. 2024. Vol. 15. P. 54–65.
23. Ridoutt B. G., et al. Environmental impacts of engineered wood products. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 234.
24. Savchuk O. V. The use of glued beams in bridge construction. *Roads and Bridges*, 2021.
25. Sendziuk V. I., Gerasimenko I. V. Building structures made of wood and plastics. Lviv: UNFU, 2017.
26. Thelandersson S., Larsen H. J. (Eds.). Timber Engineering. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

Стаття надійшла 15.02.2025