

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ ЗВИЧАЙНИХ СТОЛЯРНИХ ПЛИТ ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Обґрунтовано, деревинні ресурси повинні комплексно використовуватись, зокрема, це стосується деревинних відходів та залишків на всіх етапах виробництва. Але сьогодні, як ніколи згідно принципів циркулярної економіки, постало питання перероблення вживаної деревини – додаткового резерву деревини, яка у виробі втратила вже свої споживчі характеристики, а її утилізація мінімізує негативний вплив на довкілля. Зроблено партію СП із ВЖД шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина рейок тангентального та радіального розпилу. Експериментально визначено межі міцності під час статичного згину та під час сколювання для столярних плит із вживаної деревини ялини та побудовано дві адекватні регресійні моделі залежно від почергового укладання радіальних ($B_{\text{рад}}$) та тангентальних ($B_{\text{тан}}$) рейок ширинами 30, 50 та 70 мм при товщині 22 мм. Встановлено, що ширина рейок в конструкції столярних плит суттєво впливає на міцнісні характеристики конструкції. Виявлено, що збільшення ширини від 30 до 70 мм під час визначення межі міцності при статичному згині призводить до зменшення показника для радіальних рейок на 15-20 %, а для тангентальних – на 33-38 %; а під час визначення межі міцності при сколюванні призводить для радіальних рейок до зростання на 15-17 %, а для тангентальних до спадання – на 12-14 %. Встановлено, що межа міцності під час статичного згину всіх СП із ВЖД ялини не залежно від їх конструкції задовольняє вимоги ДСТУ13715:1978. Межа міцності під час сколювання для більшості зразків експериментальних плит, також задовольняє нормативні вимоги, крім одного, коли здійснюється укладання рейок шириною 70 мм. Встановлено за результатами експериментальних досліджень, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 35,705$ МПа можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини рейок СП із ВЖД із ялини комбінованого укладання: $B_{\text{рад}}(x_1) = 30$ мм $B_{\text{тан}}(x_2) = 30$ мм. Визначено, що максимальне значення межі міцності під час сколювання $\tau_{\text{ск}} = 1,961$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини рейок СП із ВЖД із ялини комбінованого укладання та личкованих фанерою: $B_{\text{рад}}(x_1) = 70$ мм; $B_{\text{тан}}(x_2) = 48$ мм. Рекомендовано використовувати вживану деревину виробництві столярних плит з перерізом рейок у відношенні не більшим 1:4 з комбінованим укладанням радіальних та тангентальних.

Ключові слова: вживана деревина, столярна плита, математична модель, технологія, міцність, склеювання, перероблення, циркулярна економіка.

Актуальність. Використання вживаної деревини має свої переваги і може бути вигідним в різних сферах життя, включаючи будівництво, дизайн і виробництво та має свою актуальність і велике значення з кількох причин:

- Використання вживаної деревини допомагає заощадити лісові ресурси та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, оскільки не потребує вирубування нових дерев [1-4, 8-12, 21, 22, 26-31, 35].
- Вживана деревина, як правило, коштує дешевше, ніж нова, що дозволяє економити кошти при будівництві або ремонті. Деревина має природну красу та теплоту, яка додає затишку і краси будь-якому приміщенню або об'єкту [5, 6, 20].

¹ Медвідь Любомир Володимирович – аспірант, кафедра технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103. м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-093-494-50-13. E-mail: lyubomyr.medvid@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6654-9348>

² Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, д-р техн. наук, професор, кафедра технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

- Деякі види вживаної деревини мають історичну цінність або мають особливий характер, що додає унікальний стиль будівлі або предмету. Деревина може бути дуже міцною і стійкою до зношування після правильної обробки, що робить її привабливим матеріалом для використання в різних конструкціях і виробках.

Перероблення ВЖД має велику актуальність у контексті циркулярної економіки, яка спрямована на збереження ресурсів і зменшення відходів. Перероблення ВЖД є важливим елементом циркулярної економіки, що сприяє створенню більш сталої та ефективної моделі використання ресурсів. Основні принципи циркулярної економіки, що стосуються перероблення ВЖД, включають:

- Перероблення ВЖД дозволяє зберігати природні лісові ресурси та зменшувати потребу у вирубці нових дерев [2-4, 28-32, 34-41].
- Перероблення ВЖД вимагає розвитку нових технологій та методів обробки, що може стимулювати інновації в цій галузі [7, 13-19].
- Цей процес допомагає зменшити кількість відходів, що потрапляють на смітники, та сприяє їх подальшому використанню відновлювальний ресурс. Використання переробленої ВЖД допомагає зменшити викиди в атмосферу та інші негативні впливи на довкілля, порівняно з використанням нової деревини.
- Перероблення деревини дозволяє використовувати одну і ту ж деревину у виробництві кількох продуктів, що збільшує ефективність використання ресурсів.

Проблеми. Перероблення ВЖД може зіткнутися з рядом проблем, зокрема:

- Вживана деревина може бути забруднена шкідливими речовинами або матеріалами, які ускладнюють або роблять неможливим її перероблення на вторинні матеріали. У деяких випадках може бути недостатній попит на вторинні матеріали з ВЖД, що ускладнює їх економічну вигоду та можливість їх використання.
- Деревина різних видів і якості вимагає складного сортування, щоб відокремити матеріали, які можна переробити, від тих, що не можна. У деяких регіонах можуть бути відсутні чіткі стандарти і правила для перероблення ВЖД, що ускладнює процес та може призвести до некоректного використання матеріалів.
- Деревина, яка підлягає переробленню, може бути великого розміру і важкою для транспортування, що може призвести до додаткових витрат та складнощів у виробничому процесі. Не у всіх регіонах із ВЖД є відповідна інфраструктура та технології для її ефективного перероблення, що ускладнює цей процес.
- Для перероблення ВЖД для створення столярних плит може бути потрібне спеціалізоване обладнання, що може збільшити витрати на виробництво.

Ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою відповідних технологій, стратегій управління та дотриманням вимог стандартів якості і безпеки.

Аналіз літературних джерел. Наукова спільнота активно досліджує та розробляє методи та технології перероблення ВЖД. Деякі праці включають:

1. «Перероблення ВЖД для виробництва дерев'яних композитних матеріалів» – дослідження методів перероблення ВЖД для створення нових дерев'яних композитних матеріалів з високими технічними характеристиками [7, 9-11, 14, 17].
2. «Інноваційні методи перероблення ВЖД в меблевому виробництві» – вивчення новітніх методів та технологій перероблення ВЖД для виготовлення якісних меблів з високою естетичністю та функціональністю [14, 15, 21, 23, 27].
3. «Екологічні аспекти перероблення ВЖД» – вивчення впливу перероблення ВЖД на довкілля та розробка екологічно чистих технологій перероблення.

4. «Стратегії управління відходами від перероблення ВЖД» – аналіз ефективних стратегій управління відходами від перероблення ВЖД з метою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище [1, 7-11, 17-18, 25, 28, 30, 31, 34].

5. «Використання ВЖД в будівництві: технології та економічний аналіз» – дослідження можливостей використання ВЖД в будівництві з погляду технологічності та економічної доцільності.

Ці наукові праці сприяють розвитку ефективних та сталих методів перероблення ВЖД та виробництва високоякісних продуктів з її використанням. Підставою для оцінки ВЖД з огляду на безпеку довкілля є їх хімічний склад. В НЛТУ України розроблено Класифікатор ВЖД, згідно якого всю ВЖД поділено на чотири категорії. Для матеріального використання придатна ВЖД першої та другої категорії. Із якісної очищеної ВЖД [15, 16, 27] (старих меблевих і столярно-будівельних виробів) можна отримати бруски, рейки, а також технологічну тріску.

Відсортовані та випиляні на відповідні поперечні розміри рейки із ВЖД різних порід можуть бути використані для виготовлення клеєних щитових елементів, зокрема, столярної плити [13, 16-18, 24] та меблевого щита. Але відсутність технологічних рішень, практичних рекомендацій та перевірених показників, в тому числі, на міцність, вимагають експериментальних досліджень.

Мета досліджень – визначення показників міцності звичайних столярних плит із ВЖД. **Об'єкт досліджень** – звичайні столярні плит із ВЖД ялини.

Предмет досліджень – закономірності впливу конструкцій звичайних столярних плит личкованих фанерою із ВЖД радіального та тангентального укладання на показники міцності при статичному згині та при сколюванні.

Методика досліджень. Загальна методика досліджень включає: заготівлю; очищення та сортування; технологічні операції з виготовлення рейок із ВЖД ялини, столярних щитів, взірців; випробування для визначення показників міцності при статичному згині та при сколюванні.

Матеріали для проведення досліджень – це заготовки ВЖД породи ялина, клей ПВА компанії Jowat, фанера, товщиною 4 мм. Рейки виготовлялись поперечним розміром 20×30, 20×50, 20×70 мм. Після склеювання одержували калібровані столярні щити розміром 450×450×16. Личковані фанерою столярні плити із ВЖД мали товщину 22 мм.

Для вирішення поставлених завдань досліджень було використано план другого порядку, який дозволяє отримати математичний опис об'єкта у вигляді поліному другого порядку (квадратична модель).

Для двох змінних факторів кількість дослідів В-плану дорівнює $N=2^2+2*2=8$. Оскільки на основі пошукового експерименту визначено, що в кожному досліді було проведено п'ять спостережень, тобто кількість спостережень в експерименті дорівнює $8*5=40$. Щоб уникнути систематичних помилок, усі спостереження проводили за генерацією випадкових чисел.

У результаті досліджень явища з літературних джерел, практичного досвіду і теоретичного аналізу дослідник було вибрано область експерименту (табл. 1). Змінними факторами для столярних плит були ширини рейок із ВЖД 30, 50, 70 мм радіальні ($B_{\text{рад}}$) та тангентальні ($B_{\text{тан}}$) для комбінованого укладання.

Вихідним параметром було значення межі міцності звичайних столярних плит із ВЖД ялини при статичному згині та при сколюванні.

Таблиця 1. Матриця В-плану для двох змінних факторів

№ досліду	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	$V_{рад}$	$V_{тан}$	x_1	x_2
ПФП 2 ^k	30	30	-1	-1
	70	30	1	-1
	30	70	-1	1
	70	70	1	1
Зіркові точки	30	50	-1	0
	70	50	1	0
	50	30	0	-1
	50	70	0	1

Межу міцності столярної плити [42, 43] під час статичного згину визначали на випробувальних машинах (рис. 1).



Рис. 1. Момент випробування взірців столярної плити із ВЖД

Результати одержання СП із ВЖД ялини. За результатами досліджень було виготовлено експериментальні столярні плити із ВЖД ялини для подальшого експериментального дослідження та порівняльного аналізу. Отримані столярні плити личкової фанерою з розмірами 450×450 мм (рис. 2) підлягали розкрою на взірці заданих розмірів для випробувань на міцнісні характеристики – межу міцності при статичному згині та межу міцності при сколюванні.



Рис. 2. Торці експериментальних СП із ВЖД із рейок різної ширини

Результати визначення взірців показника міцності при статичному згині звичайних СП із ВЖД ялини. Результати експериментальних випробувань на вплив ширин брусків на показники міцності при статичному згині звичайних столярних плит із ВЖД представлено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати u_{ij} показника міцності при статичному згині конструкцій СП із ВЖД ялини, МПа					Середнє значення в j-ій вибірці	Дисперсія в j-ій вибірці
	u_{1j}	u_{1j}	u_{1j}	u_{1j}	u_{1j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	34,420	34,265	36,538	35,383	34,830	35,087	0,8451
2.	30,517	30,910	31,576	31,642	31,017	31,132	0,2245
3.	26,703	26,079	27,460	26,959	26,150	26,670	0,3323
4.	22,871	22,496	23,641	23,133	22,727	22,974	0,1924
5.	31,305	30,729	32,284	31,812	31,160	31,458	0,3631
6.	25,229	25,010	26,283	25,615	24,218	25,271	0,5801
7.	33,595	33,367	34,873	34,087	33,292	33,843	0,4279
8.	24,032	23,752	24,981	24,367	23,920	24,210	0,2360
	Сума					230,65	3,2015

Дисперсію відтворюваності:
$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}; \quad (1)$$

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 3,2015/8=0,4$. Отримані коефіцієнти та їх значимість. Для визначення коефіцієнтів рівняння було використано відомі методики статистичної обробки даних і розраховано коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів регресії, перевірка на значущість коефіцієнтів рівняння регресії та визначення їх достовірних інтервалів

Коефіцієнт	Величина коефіцієнта	$t(q, f_y) S\{b_i\}$	Висновок	Межі достовірного інтервалу	
				$b_i - t_{\text{табл}} S\{b_i\}$	$b_i + t_{\text{табл}} S\{b_i\}$
b_0	28,425	0,645	знач.	27,79	29,07
b_1	-2,306	0,236	знач.	-2,54	-2,07
b_2	-4,368	0,236	знач.	-4,60	-4,13
b_{11}	-0,061	0,500	незнач.	-0,56	0,44
b_{22}	0,601	0,500	знач.	0,10	1,10
b_{12}	0,065	0,289	незнач.	-0,22	0,35

Для дисперсії адекватності (рис. 4):
$$\sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (2)$$

Таблиця 4. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
1.	35,09	35,70	0,3815
2.	31,13	30,96	0,0287
3.	26,67	26,84	0,0287
4.	22,97	22,36	0,3815
5.	31,46	30,67	0,6195
6.	25,27	26,06	0,6195
7.	33,84	33,39	0,2008
8.	24,21	24,66	0,2008
Сума			2,4611

$$\text{Визначаємо дисперсію адекватності: } S_{ad}^2 = \frac{n}{f_{ad}} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (3)$$

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 2,4611 = 12,30526.$$

$$\text{Розрахункове значення критерію Фішера: } F_{роз.} = \frac{S_{б\ddot{л}иша}^2}{S_{м\ddot{н}иша}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4)$$

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{роз.}$: $F_{роз.} = 12,30526/0,4 = 30,75$.

Табличне значення критерію Фішера $F_{табл.}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{табл.}=250$.

Оскільки, $30,75 < 250$ ($F_{роз.} < F_{табл.}$), тоді регресійна модель адекватна.

За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини структурних елементів, тобто ширини рейок з ялини (радіал) $V_{рад}$ (x_1) та з ялини (тангентал) $V_{тан}$ (x_2).

Одержане рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів має вигляд: $y(\sigma_u) = 28,425 - 2,306x_1 - 4,368x_2 - 0,061x_1^2 + 0,601x_2^2 + 0,065x_1x_2$.

Отже, ширина рейок в конструкції СП із ВЖД ялини суттєво впливає на межу міцності під час статичного згину σ_u . Обидва змінних фактори впливають оберненопропорційно. Найбільше на межу міцності під час статичного згину σ_u СП із ВЖД ялини з почерговим укладанням за кутом нахилу річних шарів радіальних (кут нахилу річних кілець у поперечному перерізі брусків $61-90^\circ$) та тангентальних (кут нахилу річних кілець у поперечному перерізі брусків $1-30^\circ$) впливає другий фактор $V_{тан}$ (x_2) – ширина тангентальних рейок. Вплив другого фактору на межу міцності під час статичного згину σ_u у порівнянні з першим (радіал) $V_{рад}$ (x_1) є в 1,89 рази більшим. Графічна інтерпретація залежностей на рис. 3 та рис. 4.

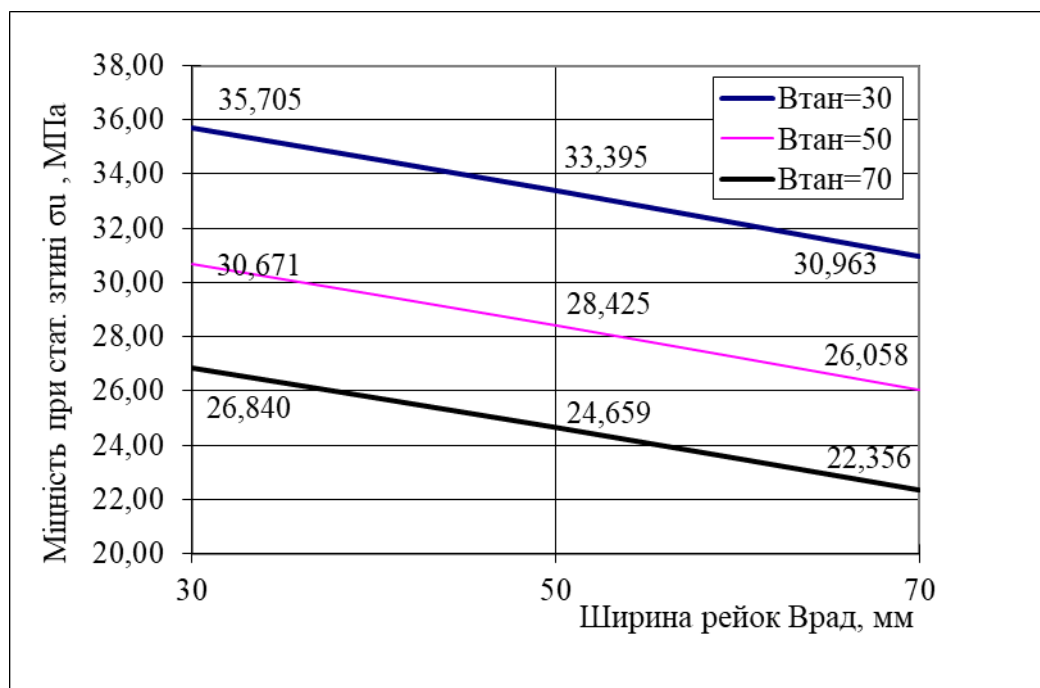


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини рейки з ялини (радіал) $V_{рад}$ (x_1) в конструкції столярної плити

Як видно з рис. 3, збільшення ширина рейки з ялини (радіал) $V_{\text{рад}}(x_1)$ в конструкції СП із ВЖД не призводить до суттєвого зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u . Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейки з ялини (тангентал) $V_{\text{тан}}(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є суттєвою (рис. 4). Межі міцності σ_u (15 МПа) для всіх зразків експериментальних СП, задовольняють вимоги стандарту ДСТУ 13715:1978.

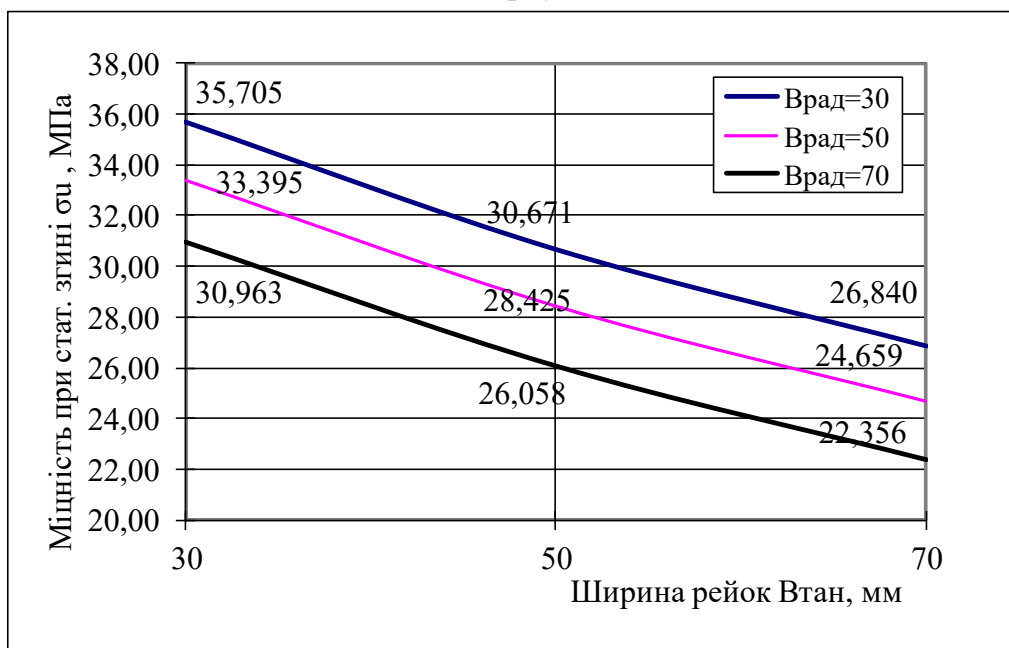


Рис. 4. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини рейки з ялини (тангентал) $V_{\text{тан}}(x_2)$ в конструкції столярної плити

За результатами експерименту здійснено оптимізацію ширини рейок за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 35,705$ МПа, взяте за абсолютною величиною можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини рейок СП із ВЖД із ялини комбінованого укладання: (радіал) $V_{\text{рад}}(x_1) = 30$ мм; (тангентал) $V_{\text{тан}}(x_2) = 30$ мм (рис. 5).

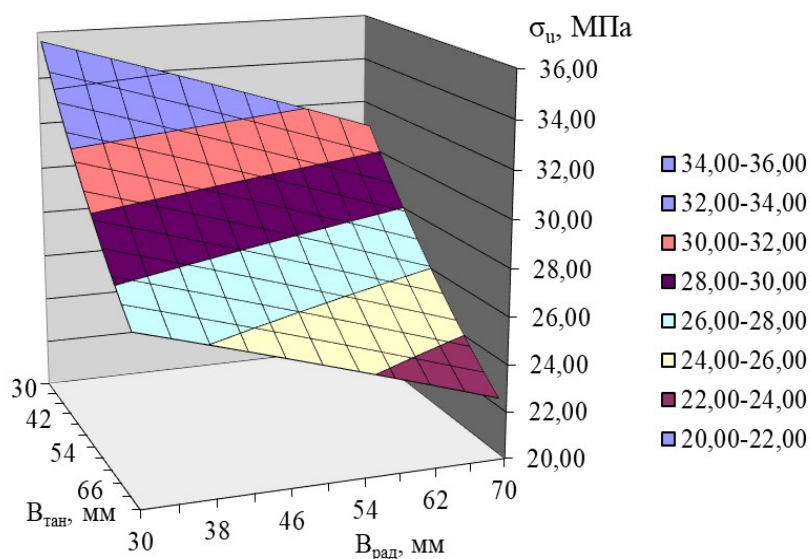


Рис. 5. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини рейки з ялини почергового укладання (радіал – тангентал)

Результати визначення взірців показника міцності при сколюванні звичайних СП із ВЖД ялини. Результати експериментальних випробувань на вплив ширин брусків на показники міцності при сколюванні звичайних столярних плит із ВЖД представлено у табл. 5.

Таблиця 5. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати y_{ij} показника міцності при сколюванні конструкцій СП із ВЖД ялини, МПа					Середнє значення в j -ій вибірці	Дисперсія в j -ій вибірці
	y_{1j}	y_{2j}	y_{3j}	y_{4j}	y_{5j}		
1.	1,569	1,697	1,677	1,587	1,553	1,616	0,0043
2.	1,813	1,956	1,951	1,831	1,795	1,869	0,0061
3.	1,348	1,494	1,506	1,364	1,363	1,415	0,0061
4.	1,601	1,697	1,721	1,653	1,647	1,664	0,0022
5.	1,569	1,671	1,679	1,599	1,574	1,618	0,0028
6.	1,948	2,073	2,125	1,982	1,910	2,008	0,0079
7.	1,684	1,828	1,820	1,716	1,669	1,743	0,0057
8.	1,506	1,633	1,616	1,531	1,499	1,557	0,0040
	Сума					13,49	0,0391

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 0,0391/8 = 0,0048875$. Коефіцієнти рівняння регресії у табл. 6.

Таблиця 6. Розрахунок коефіцієнтів регресії, перевірка на значущість коефіцієнтів рівняння регресії та визначення їх достовірних інтервалів

Коефіцієнт	Величина коефіцієнта	$t(q, f_y) S\{b_i\}$	Висновок	Межі достовірного інтервалу	
				$b_i - t_{\text{табл}} S\{b_i\}$	$b_i + t_{\text{табл}} S\{b_i\}$
b_0	1,822	0,071	знач.	1,75	1,89
b_1	0,148	0,026	знач.	0,12	0,17
b_2	-0,099	0,026	знач.	-0,12	-0,07
b_{11}	-0,009	0,055	незнач.	-0,06	0,05
b_{22}	-0,172	0,055	знач.	-0,23	-0,12
b_{12}	-0,001	0,032	незнач.	-0,03	0,03

Розрахунок дисперсії адекватності заносимо у табл. 7.

Таблиця 7. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліджу	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
1.	1,62	1,59	0,0007
2.	1,87	1,89	0,0004
3.	1,41	1,39	0,0004
4.	1,66	1,69	0,0007
5.	1,62	1,66	0,0021
6.	2,01	1,96	0,0021
7.	1,74	1,75	0,0000
8.	1,56	1,55	0,0000
Сума			0,0065

Визначення значення дисперсії адекватності за формулою 3:

$$S_{ao}^2 = 5/(8-7) \times 0,0065 = 0,032509.$$

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{розр}$: $F_{розр} = 0,032509/ 0,0048875 = 6,66$.

Табличне значення критерію Фішера $F_{табл.}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ад}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{табл.}=250$.

Оскільки, $6,66 < 250$ ($F_{розр} < F_{табл.}$), тоді регресійна модель адекватна.

За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність межі міцності під час сколювання $\tau_{ск}$ від ширини структурних елементів, тобто ширини рейок з ялини (радіал) $V_{рад}$ (x_1) та з ялини (тангентал) $V_{тан}$ (x_2).

Одержане рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів має вигляд: $y(\tau_{ск}) = 1,822 + 0,148x_1 - 0,099x_2 - 0,009x_1^2 - 0,172x_2^2 - 0,001x_1x_2$

Отже, ширина рейок в конструкції СП із ВЖД ялини суттєво впливає на межу міцності під час сколювання $\tau_{ск}$. Обидва змінних фактори впливають по різному: перший фактор – прямопропорційно, а другий – оберненопропорційно. Найбільше на межу міцності під час сколювання $\tau_{ск}$ із ВЖД ялини з почерговим укладанням за кутом нахилу річних шарів радіальних ($61-90^\circ$) та тангентальних ($1-30^\circ$) впливає перший (радіал) $V_{рад}$ (x_1) – ширина радіальних рейок. Вплив першого фактору на межу міцності під час сколювання $\tau_{ск}$ у порівнянні з другим $V_{тан}$ (x_2) є в 1,49 рази більшим. Графічна інтерпретація на рис. 6 та рис. 7.

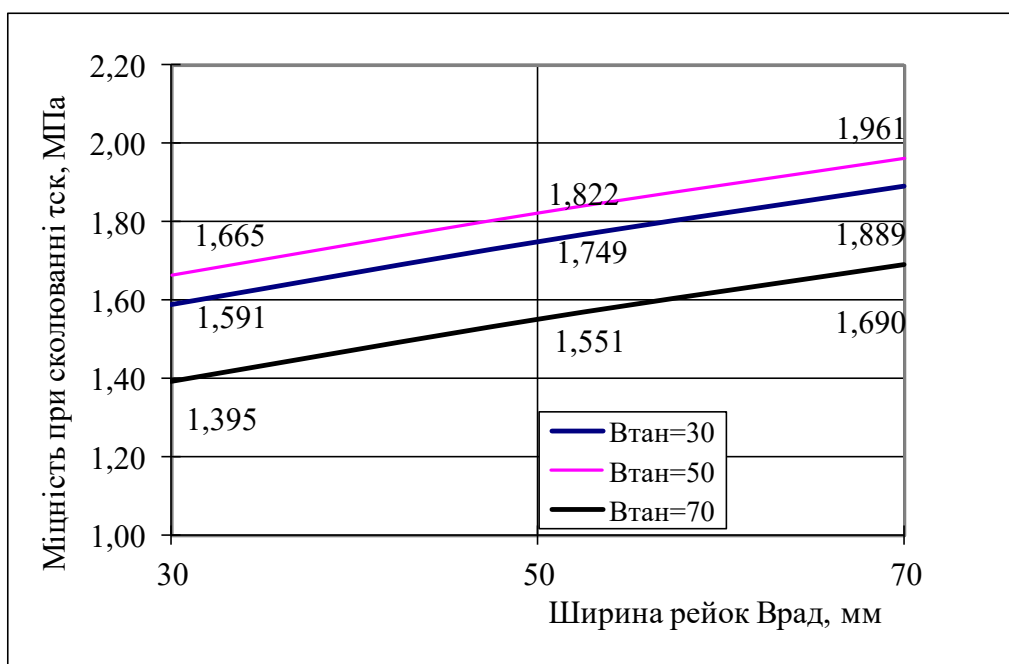


Рис. 6. Залежність межі міцності під час сколювання $\tau_{ск}$ від ширини рейки з ялини (радіал) $V_{рад}$ (x_1) в конструкції столярної плити

Як видно з рис. 6, збільшення ширини рейки з ялини (радіал) $V_{рад}$ (x_1) в конструкції СП із ВЖД призводить до зростання межі міцності під час сколювання $\tau_{ск}$. Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейки з ялини (тангентал) $V_{тан}$ (x_2) описує зменшення межі міцності під час сколювання $\tau_{ск}$ є суттєвою (рис. 4). Межі міцності $\tau_{ск}$ (1 МПа) для більшості зразків експериментальних плит, задовольняють вимоги стандарту ДСТУ13715:1978, крім одного, де є почергове укладання рейок шириною 70 мм. За укладання радіальної рейки шириною 70 мм, тангентальна не може бути ширшою, ніж 62 мм, так як значення межі міцності під час сколювання $\tau_{ск}$ буде меншим за нормоване значення.

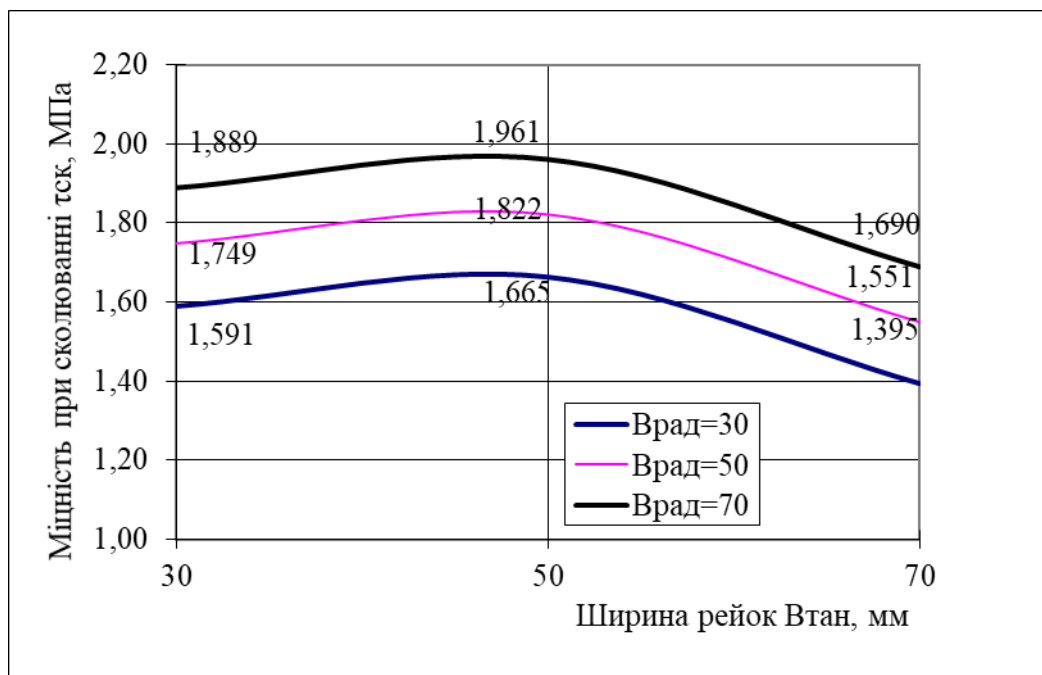


Рис. 7. Залежність межі міцності під час сколювання $\tau_{\text{ск}}$ від ширини рейки з ялини (тангентал) $V_{\text{тан}}$ (x_2) в конструкції столярної плити

За результатами експерименту здійснено оптимізацію ширини рейок за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час сколювання $\tau_{\text{ск}} = 1,961$ МПа, взяте за абсолютною величиною можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини рейок СП із ВЖД комбінованого укладання: ялини (радіал) $V_{\text{рад}}(x_1) = 70$ мм; ширина рейки з ялини (тангентал) $V_{\text{тан}}(x_2) = 48$ мм (рис. 8).

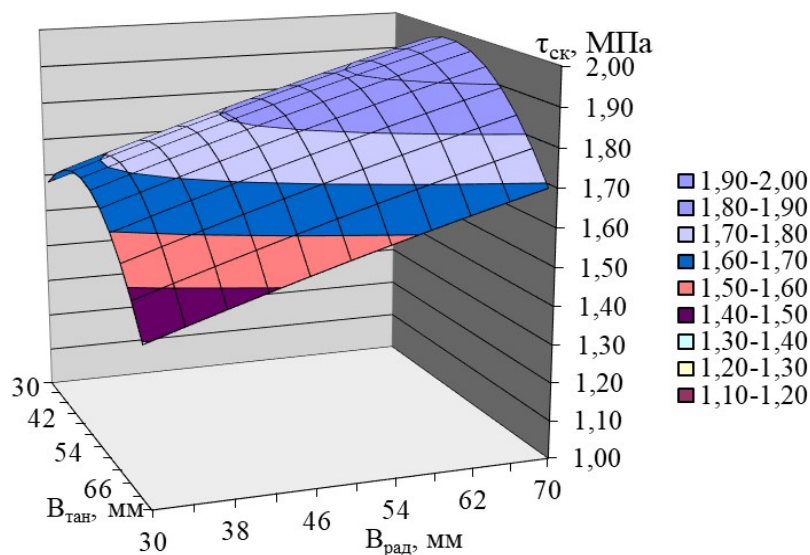


Рис. 8. Залежність межі міцності під час сколювання $\tau_{\text{ск}}$ від ширини рейки з ялини почергового укладання (радіал – тангентал)

Висновки та рекомендації.

1. Обґрунтовано, що деревинні ресурси повинні комплексно використовуватись, зокрема, це стосується деревинних залишків на всіх етапах виробництва. Але сьогодні, як ніколи згідно принципів циркулярної економіки, постало питання перероблення ВЖД як додаткового резерву деревини, яка у виробі втратила

вже свої споживчі характеристики, а її утилізація мінімізує негативний вплив на довкілля. Зроблено партію СП із ВЖД шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина рейок тангентального та радіального розпилу.

2. Експериментально визначено межі міцності під час статичного згину та під час сколювання для СП із ВЖД ялини та побудовано дві адекватні регресійні моделі залежно від почергового укладання радіальних ($B_{\text{рад}}$) та тангентальних ($B_{\text{тан}}$) рейок ширинами 30, 50 та 70 мм при товщині 22 мм. Встановлено, що ширина рейок в конструкції СП суттєво впливає на міцнісні характеристики конструкції.

3. Виявлено, що збільшення ширини від 30 до 70 мм під час визначення межі міцності при статичному згині призводить до зменшення показника для радіальних рейок на 15-20 %, а для тангентальних – на 33-38 %; а під час визначення межі міцності при сколюванні призводить для радіальних рейок до зростання на 15-17 %, а для тангентальних до спадання – на 12-14 %.

4. Встановлено, що межа міцності під час статичного згину всіх СП із ВЖД ялини не залежно від їх конструкції задовольняє вимоги ДСТУ 13715:1978. Межа міцності під час сколювання для більшості зразків експериментальних плит також задовольняють нормативні вимоги, крім одного, коли здійснюється укладання рейок шириною 70 мм. Встановлено за результатами експериментальних досліджень, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_{\text{ц}} = 35,705$ МПа можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини рейок СП із ВЖД із ялини комбінованого укладання: $B_{\text{рад}}(x_1) = 30$ мм $B_{\text{тан}}(x_2) = 30$ мм

5. Встановлено, що максимальне значення межі міцності під час сколювання $\tau_{\text{ск}} = 1,961$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини рейок СП із ВЖД із ялини комбінованого укладання та личкованих фанерою: $B_{\text{рад}}(x_1) = 70$ мм; $B_{\text{тан}}(x_2) = 48$ мм.

6. Рекомендовано використовувати вживану деревину виробництві столярних плит з перерізом рейок у відношенні не більшим 1:4 з комбінованим укладанням радіальних та тангентальних.

References

1. Bekhta P.A., Onisko V., Mateyak M., Kuehne G., Dobrovolska E., Shvachyna I. (1999): Перспективи повторного використання вживаної деревини / *Perspektyvy povtornoho vykorystannya vzhynanoyi derevyny* [Prospects of reuse of used wood] Scientific Bulletin of the UNFU 9.5:34-45, (in Ukrainian).

2. **Circularity Gap Report** (2022): five years of analysis by Circle Economy https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/1_report_cgr_global_2022.

3. **European Commission** (2015): Closing the Loop – an Action Plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels. (2015), <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

4. Evdokimov V.V., Hrytyshen D.O., Sergienko L.V. (2016) : Циркулярна економіка [Circular economy]. – Zhytomyr: – 200 p. (in Ukrainian).

5. Gayda S.V. (2019). Scientific and technical basis of the use of used wood in woodworking: the- sis of the Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23. – Lviv: UNFU. – 465 (in Ukrainian).

6. Gayda S.V. (2017). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної дере- вини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhynanoyi derevyny yalytsi z vikom* [The complex studies on the change of elastic properties of post-consumer fir wood with age]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 43:58-72 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174308>

7. Gayda S.V. (2009): Potential of post-consumer recovered wood and possible ways of it using in Ukraine // Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 35:63-83.

8. **Gayda S.V.** (2015): Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 41:39-49.
9. **Gayda S.V.** (2013): Ресурсоощадні технології перероблення вживаної деревини / *Resursooshchadni tekhnologii pereroblennya vzhivanoi derevini* [Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: *Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
10. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018): Формостійкість як критерій якості столярних плит із ВЖД / *Formostiyst' yak kryteriy yakosti stolyarnykh plyt iz vzhivanoyi derevyny* [Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards]. Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine 17:185-192 (in Ukrainian).
11. **Gayda S.V.** (2014): Techniques for recycled of post-consumer wood in the production of quality particleboard. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 40:41-51.
12. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
13. **Gayda S.V.** (2016): 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* 42: 33-50. doi: <https://doi.org/10.36930/42164206>
14. **Gayda S.V.** (2016): Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. Bulletin of KhNTUA 178:3-11, (in Ukrainian).
15. **Gayda S.V.** (2017): Використання нечітких експертних систем для підтримки прийняття рішень в процесі сортування вживаної деревини / *Vykorystannya nechitkykh ekspertnykh system dlya pidtrymky pryynyattya rishen' v protsesi sortuvannya vzhivanoyi derevyny* [Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:5-20 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174301>
16. **Gayda S.V.** (2018): *Mitsnist kombinovanykh stolyarnykh plyt iz vzhivanoyi derevyny* [Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW)]. Bulletin of KhNTUA 197:3-9.
17. **Gayda S.V.** (2018): Дослідження та аналіз характеристик щитових конструкцій із вживаної деревини / *Doslidzhennya ta analiz kharakterystyk shchytovykh konstruktsiy iz vzhivanoyi derevyny* [A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:15-25, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184402>
18. **Gayda S.V.** (2017): A technology and properties of furniture board (FB) made of post-consumer wood (PCW). Actual problems of forest complex 48:34-38 (in Russian).
19. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021): Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhivanoyi derevyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products]. Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine 23:152-162, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/412135>
20. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard / Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть // міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУ України. – 2010, вип. 36. – С. 57-77.
21. **Gayda S.V., Lesiv L.E.** (2019): Визначення та порівняння властивостей вживаної деревини основних хвойних порід / *Vyznachennya ta porivnyannya vlastyvostey vzhivanoyi derevyny osnovnykh khvoynykh porid* [A determination and comparison of properties of post-consumer wood of the basic conifers]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45:39-46, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194506>

22. **Gayda S.V., Voronovich V.V.** (2011): *Issledovanie osobennostey gnut'ya vtorichno ispol'zue-moy drevesiny* [Investigation of the features of bending of post-consumer wood]. *Scientific progress – creative young: proceedings of the International Scientific Conference, Mari State University*: 190-192, (in Russian).
23. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020) : Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnologichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktсий* [Research of technological processes of production of legs of tables of various designs]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:36-49, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204604>
24. **Gayda, S., Kiyko, O.** (2020): The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*, 63(206), 77-102. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>
25. **Gayda, S., Kiyko, O.** (2023): Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*, 66(212), doi: <https://doi.org/10.53502/wood-177453>
26. **Gayda, S.V., Kiyko O.A., Guz M.M.** (2022): Research of the structure of stump and rootwood for effective use in the production of wood products. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64 (3):131-142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
27. **Gayda, S.V., Kiyko, O.A.** (2020): Determining the regime parameters for the surface cleaning of post-consumer wood by a needle milling tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 [1 [107]], 89–97. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
28. **Höglmeier K., Steubing B., Weber-Blaschke G., Richter K.** (2015): LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood. *J. Environ. Manag.*, 152, pp. 158-170, <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2015.01.018>.
29. **Kiyko O.A., Yakuba M.M., Voytovych I.G. et al.** (2010) : Кластерний підхід і кластерний аналіз у лісовому секторі / *Klasternyy pidkhid i klasternyy analiz u lisovomu sektori* [Cluster approach and cluster analysis in the forest sector]. – Ivano-Frankivsk: Foliant, – 260 p.
30. **Medvid L.M.** (2021). Вживана деревина – додатковий резерв сировини для конструкцій-них матеріалів / *Vzhyvana derevyna – dodatkovyy rezerv syrovyny dlya konstruktсийnykh materialiv* [Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:34-46, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214706>
31. **Medvid L.V.** (2018): Систематизація деревинних відходів – основа їх ефективного використання / *Systematyzatsiya derevynnykh vidkhodiv – osnova yikh efektyvnoho vykorystannya* [Systematization of wood waste – the basis of their effective use] // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44: 91-104, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184412>
32. **Murray A., Skene K., Haynes K.** (2017) : The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J. Bus. Ethics*, № 140(3). P. 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
33. **Podibka T.I., Kiyko O.A.** (2019): Дослідження впливу поперечних розмірів букових рейок на формостійкість меблевих щитів *Doslidzhennya vplyvu poperechnykh rozmiriv bukovykh reyok na formostiyst' meblevykh shchytiv* [A study of the influence of the transverse dimensions of beech of strips on the form of stability of furniture board]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45: 155-171, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194521>
34. **Project «CircHive – Developing & piloting biodiversity footprinting & natural capital accounting via a 'beehive' of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy».** Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
35. **Ratajczak E.** (2003): *Zasoby odpadow drzewnych w Polsce* / E. Ratajczak, A Szostak. Poznan: Czysta Energia,– Vol. 6. – P. 122-125.
36. **Reike D., Vermeulen Walter J.V.** (2018) : The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // *Resources, Conservation and Recycling*. P. 246-264.
37. **Shevchenko T. I., Shuptar-Porivayeva N. Y., Gubanova O. R. and others.** (2022): Циркулярна економіка [Circular economy]. Sumy: University book. – 220 p. (in Ukrainian).

38. Suominen T., Kunttu J., Jasinevičius G., Tuomasjukka D. & Lindner M. (2017): Trade-offs in sustainability impacts of introducing cascade use of wood, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32:7,588-597, doi: [10.1080/02827581.2017.1342859](https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859).
39. Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, H.S. et al. (2021): Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ Sustain Soc* 11, 10. doi: <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
40. Tuomasjukka D., Athanassiadis D. & Vis M. (2017): Threefold sustainability impact assessment method comparison for renewable energy value chains, *International Journal of Forest Engineering*, 28:2, 116-122, doi: <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1318549>.
41. Werner F., Taverna R., Hofer P., Thürig E., Kaufmann E. (2010) : National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environ. Sci. Pol.*, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004>.
42. DIN 68705-2:2014-10 Plywood – Part 2: Blockboard and laminboard for general use. Germany, (in Deutsch).
43. GOST 13715-78 *Plity stolyarnye. Tekhnicheskie usloviya* [Blockboards. Technical specifications]. Moscow: Publishing house of standards, (in Russian).

UDC 674-419.33:674.8

*Post-graduate student L.M. Medvid;
prof. S.V. Gayda, Doktor of Sciences – UNFU*

Determination of the strength indicators of normal blockboard made of post-consumer wood

Reasonably, wood resources should be used comprehensively, in particular, this applies to wood waste and residues at all stages of production. But today, as never before, according to the principles of the circular economy, the issue of processing post-consumer wood (PCW) has arisen - an additional reserve of wood that has already lost its consumer characteristics in products, and its disposal minimizes the negative impact on the environment. A batch of PCW-made blockboard was made by implementing the B-plan of the second order, where the variables were the width of the rails of tangential and radial sawing. The limits of strength during static bending and during chipping for PCW-made blockboard spruce wood were experimentally determined and two adequate regression models were built depending on the alternate laying of radial (B_{rad}) and tangential (B_{tan}) rails with widths of 30, 50 and 70 mm at a thickness of 22 mm. It was established that the width of the rails in the construction of carpentry boards significantly affects the strength characteristics of the structure. It was found that an increase in width from 30 to 70 mm during the determination of the strength limit in static bending leads to a decrease in the indicator for radial rails by 15-20%, and for tangential rails - by 33-38%; and during the determination of the limit of rocking strength, it leads to an increase of 15-17% for radial rails, and a decrease of 12-14% for tangential rails. It was established that the strength limit during static bending of all PCW-made blockboard spruce, regardless of their design, meets the requirements of DSTU13715:1978. The limit of strength during chipping for most of the samples of experimental boards also meets the regulatory requirements, except for one, when laying rails with a width of 70 mm. According to the results of experimental studies, it was established that the maximum value of the strength limit during static bending $\sigma_u = 35.705$ MPa can be obtained by fixing the dimensional parameters of the width of the rails PCW-made blockboard from spruce of combined stacking: $B_{rad}(x_1) = 30$ mm $B_{tan}(x_2) = 30$ mm. It was established that the maximum value of the strength limit during chipping $\tau_{sk} = 1.961$ MPa, taken as an absolute value, can be obtained by fixing the dimensional parameters of the width of the slats of carpentry boards made of PCW from spruce combined stacking and veneered with plywood: $B_{rad}(x_1) = 70$ mm; $B_{tan}(x_2) = 48$ mm. It is recommended to use post-consumer wood for the production of blockboard with a cross-section of rails in a ratio no larger than 1:4 with a combined arrangement of radial and tangential ones.

Keywords: post-consumer wood, blockboard, mathematical model, technology, strength, gluing, recycling, circular economy.