



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412426>

Article received 2023.12.14
Article accepted 2024.10.18

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online

@ ✉ Correspondence author

Serhiy Gayda
serhiy.hayda@nltu.edu.ua

103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine

УДК 674-419.33:674.8

Побудова математичної моделі міцності столярних плит різних конструкцій із вживаної деревини

С. В. Гайда¹, Л. В. Медвідь²

Різні деревинні ресурси повинні раціонально та комплексно використовуватись, зокрема, деревинні залишки від різних стадій обробки первинної деревини – від лісозаготівлі до створення готових виробів. Також актуальним є питання перероблення вживаної деревини як додаткового резерву, яка у виробі вже втратила свої споживчі характеристики, однак яка, за правильного перероблення, мінімізує негативний вплив на довкілля. При цьому частково вирішується низка проблем, пов'язаних зі збільшення деревинних залишків і відходів та нагромадженням вживаної деревини на звалищах.

Підготовлено партію столярних плит із вживаної деревини (СП із ВЖД) сосни шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина рейок тангентального та радіального розпилювання. Експериментальним шляхом встановлено межу міцності під час статичного згину для СП із ВЖД сосни та побудовано адекватну математичну (регресійну) модель залежно від почергового укладання радіальних ($B_{рад}$) і тангентальних ($B_{тан}$) рейок за шириною 32, 52 та 72 мм. Ширина рейок в конструкціях СП із ВЖД завтовшки 22 мм суттєво впливає на міцнісні характеристики щитів. Збільшення ширини від 32 до 72 мм під час визначення межі міцності при статичному згині призводить до зменшення показника для радіальних рейок – на 13,29-16,70%, для тангентальних – на 24,83-27,79%. Встановлено, що межа міцності під час статичного згину всіх СП із ВЖД сосни, незалежно від їхньої конструкції, задовольняє нормативні вимоги.

За результатами експериментальних досліджень, максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 39,199$ МПа можна отримати, зафіксувавши розміри ширин рейок СП із ВЖД із сосни комбінованого укладання на рівні: $B_{рад}(x_1) = 32$ мм, $B_{тан}(x_2) = 32$ мм. Рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва столярних плит з перерізом рейок та відношенням не більшим як 1:5 за комбінованого укладання радіальних і тангентальних рейок, а за довільного укладання – за відношенням не більшим як 1:3.

Рекомендовано такі параметри для виробництва СП із ВЖД для рейок: вологість – $8 \pm 2\%$; ширина у 3-5 разів більша, ніж товщина; розташування – радіальне або під кутом більше 45° ; личкування – фанерою завтовшки 3 мм; витрата клею для щита – 200-250 г/м²; витрата клею для личкування СП – 150-200 г/м²; температура вайми для щита – 85-90°C; температура пресу для СП – 115-125°C; час витримки під тиском для щита – 30-40 хв; час витримки під тиском для СП – 4-6 хв; тиск для щита – 0,5-1,0 МПа, для СП – 1,2-1,3 МПа. Відсортовані та випилані на відповідні поперечні розміри рейки із ВЖД різних деревних порід можуть бути використані для виготовлення клеєних щитових елементів, зокрема, столярної плити та меблевого щита.

Ключові слова: регресійна модель; міцність при статичному згині; міцність склеювання; технологія; перероблення; клеєні конструкції; меблевий щит; сосна звичайна; циркулярна економіка.

¹ Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661>

² Медвідь Любомир Володимирович – аспірант кафедри технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75. E-mail: lyubomyr.medvid@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6654-9348>

Вступ (Introduction). Використання вживаної деревини (ВЖД) має свої переваги і може бути вигідним у різних сферах життєдіяльності, включаючи будівництво, дизайн, виробництво конструкційних матеріалів і меблевих виробів. З іншого боку, перероблення ВЖД допоможе заощадити лісові ресурси та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, оскільки обсяги первинної деревини (ПД) можуть бути меншими (Ratajczak, & Szostak, 2003; Werner et al., 2010; Suominen et al., 2017; Медвідь, 2018, 2021; Titus et al., 2021; Лесів, Гайда, 2023). За результатами досліджень (Гайда, 2017a, 2017b; Gayda, & Kiyko, 2020b) ВЖД деяких деревних порід не поступається за фізико-механічними властивостями первинній деревині.

Перероблення ВЖД також є важливим елементом циркулярної економіки, що сприяє створенню сталої та ефективної моделі використання ресурсів. З цього напрямку досліджень існує низка наукових робіт (Дяк, Гайда, 2011; Bezama, 2016; Blomsma, & Brennan, 2017; Murray, Skene, & Haynes, 2017; Tuomasjukka, Athanassiadis, & Vis, 2017). Матеріальне застосування ВЖД дає змогу залучати цей додатковий ресурс для створення конструкційних виробів (Ratajczak, & Szostak, 2003; Reike, Vermeulen, & Witjes, 2018; Gayda, & Kiyko, 2020a; Гайда, Кійко, 2021). Проте перероблення ВЖД вимагає розвитку нових технологій та методів обробки, що, безперечно, може стимулювати інновації у цій галузі (Оріховський, Гайда, 2024; Петришак, Гайда, 2020). Крім того, впровадження процесів перероблення дасть змогу використовувати одну і ту ж деревину у виробництві декількох виробів, що збільшує ефективність використання ресурсів (Gayda, & Kiyko, 2020a; Медвідь, 2021; Лесів, Гайда, 2023). Перероблення ВЖД допомагає зменшити кількість відходів, що потрапляють на смітники, та сприяє їх подальшому використанню як відновлювального ресурсу.

Основна проблема під час перероблення ВЖД полягає в тому, що вона може бути забруднена шкідливими речовинами або матеріалами, які ускладнюють або роблять неможливим її перероблення на конструкційні щитові матеріали (Медвідь, 2018). У деяких випадках може бути недостатній попит на ВЖД, як сировинного ресурсу, відсутність відповідної інфраструктури і технології для її ефективного перероблення, що знижує їх економічну вигоду та можливість використання. Наприклад ВЖД, яку спрямовують для створення столярних плит, може вимагати спеціалізованого обладнання, що, відповідно, збільшить витрати на виробництво. Ці проблеми можуть бути вирішені шляхом застосування відповідних технологій, стратегій управління та дотримання вимог стандартів якості.

Стосовно ВЖД, то наукова спільнота активно досліджує та розробляє методи і технології її перероблення, зокрема, розроблення методів пере-

роблення ВЖД для створення нових дерев'яних композитних матеріалів з високими технічними характеристиками. Дослідження ВЖД у подрібненому вигляді, зокрема у виробництві деревинно-стружкових плит, подані та детально описані в окремих наукових працях (Gayda, & Maksymiv, 2010; Дяк, Гайда, 2011). Результати низки експериментальних досліджень підтверджують можливість використання ВЖД у виробництві столярних плит (Gayda, 2015, 2016; Gayda, & Kiyko, 2020b; Гайда, Кійко, 2018; Лесів, 2022; Медвідь, Гайда, 2023).

Інноваційні методи перероблення ВЖД у меблевому виробництві прослідковуються у працях науковців, які займалися залученням вживаної деревини для виготовлення гнутих заготовок (Грицак, Гайда, 2020), меблевих щитів (Білий, Гайда, 2016; Подібка, Кійко, 2019; Гайда, 2017b; Петришак, Гайда, Гуменюк, 2023) та іншої продукції з різними підготовчими і технологічними процесами (Войтович, Гайда, Оріховський, 2020; Гайда, Ільків, Савка, 2021; Гайда, Салапак, Лесів, 2021; Грицак та ін., 2023; Лесів, Гайда, Салапак, 2024).

Застосування ВЖД у будівельній і деревообробній галузях необхідно аналізувати з погляду технологічності та економічної доцільності, що зазначається в різних документах і проектах (Project “CircHive”, 2022; European Commission, 2015; Circularity Gap Report, 2022).

Аналіз наукових праць підтвердив актуальність цих питань, оскільки їх вирішення буде сприяти розвитку ефективних і сталих методів перероблення ВЖД та виробництву високоякісних виробів, необхідних для меблевого виробництва.

Підставою для оцінювання ВЖД, з огляду на безпеку довкілля, є її хімічний склад. В НЛТУ України розроблено Класифікатор ВЖД, згідно з яким всю ВЖД поділено на чотири категорії. Для матеріального використання придатна ВЖД першої та другої категорій. Із якісно очищеної ВЖД (старих меблевих і столярно-будівельних виробів) можна отримати бруски, рейки, а також технологічну тріску.

Відсортвані та випиляні на відповідні поперечні розміри рейки із ВЖД різних порід можуть бути використані для виготовлення клеєних щитових елементів, зокрема, столярної плити та меблевого щита. Але відсутність технологічних рішень для запропонованої продукції та перевірених показників, зокрема на міцність, вимагають експериментальних досліджень. Тому, безперечно, розроблення практичних рекомендацій, що включають математичну модель міцності столярних плит різних конструкцій із ВЖД, є основою для швидкого впровадження цього додаткового ресурсу у технологічні процеси.

Виходячи із реалізації принципів циркулярної економіки, *актуальність досліджень* полягає у збереженні первинних деревинних ресурсів, зменшенні деревинних залишків і відходів, ство-

ренні конструкційних матеріалів, в уникненні нагромаджень ВЖД на звалищах, покращенні екологічної ситуації.

Практичне значення роботи полягає в отриманні закономірностей впливу ширини рейок з радіальних і тангентальних заготовок у столярних плитах на міцність при статичному згині, що дає змогу встановити раціональні схеми укладання рейок, застосовувати оптимальне співвідношення сторін у перерізі рейок для забезпечення найвищої якості в конструкціях плит.

Об'єкти та методика досліджень (Objects and methods). *Об'єкт досліджень* – звичайні столярні плити із ВЖД сосни звичайної. *Предмет досліджень* – закономірності впливу конструкцій звичайних столярних плит, личкованих фанерою із ВЖД радіального і тангентального укладання, на показники міцності при статичному згині. *Мета досліджень* полягає у побудові математичної моделі міцності столярних плит із вживаної деревини, що описує залежність від застосування комбінованого укладання тангентальних і радіальних рейок в конструкції.

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

Матеріали для проведення досліджень – це заготовки ВЖД із сосни, клей ПВА компанії Jowat, фанера завтовшки 4 мм. Рейки виготовляли з поперечним розміром 20×32, 20×52, 20×72 мм. Після склеювання отримували калібровані столярні щити розміром 452×452×16 мм. Личковані фанерою столярні плити із ВЖД мали товщину 22 мм. Для вирішення завдань досліджень було використано план другого порядку, який дає змогу отримати математичний опис об'єкта у вигляді полінома другого порядку (квадратична модель).

Для двох змінних факторів кількість дослідів В-плану дорівнює $N=2^2+2 \times 2=8$. Оскільки, на основі пошукового експерименту встановлено, що в кожному досліді здійснено п'ять спостережень, то кількість спостережень в експерименті становить $8 \times 5=40$. Щоб уникнути систематичних поми-

лок, усі спостереження проводили за генерацією випадкових чисел.

На основі аналізу результатів досліджень з літературних джерел, практичного досвіду і теоретичного аналізу досліджень було вибрано область експерименту (табл. 1). Змінними факторами для столярних плит були різні ширини рейок із ВЖД – 32, 52, 72 мм радіальні ($B_{\text{рад}}$) і тангентальні ($B_{\text{тан}}$) для комбінованого укладання. Вихідним параметром було значення межі міцності звичайних столярних плит із ВЖД сосни при статичному згині.

Межу міцності столярної плити під час статичного згину визначали на сертифікованій випробувальній машині.

Таблиця 1. Матриця В-плану для двох змінних факторів

Table 1. B-plan matrix for two variable factors

№ досліді	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	$B_{\text{рад}}$	$B_{\text{тан}}$	x_1	x_2
ПФП 2 ^k	32	32	-1	-1
	72	32	1	-1
	32	72	-1	1
	72	72	1	1
Зіркові точки	32	52	-1	0
	72	52	1	0
	52	32	0	-1
	52	72	0	1

Результати (Results). Згідно з методикою досліджень, було виготовлено експериментальні столярні плити із ВЖД сосни звичайної для подальшого дослідження та порівняльного аналізу (рис. 1). Отримані столярні плити, личковані фанерою з розмірами 452×452 мм, підлягали розкрою на зразки заданих розмірів для випробувань на межу міцності при статичному згині (рис. 2).



Рис. 1. Конструкції звичайної СП із ВЖД товщиною 22 мм з шириною рейок 32, 52 та 72 мм зі склеєними рейками та личкованих фанерою з двох боків товщиною 3 мм

Fig. 1. Designs of conventional PCW-made blockboards of 22 mm thick with a width of strips of 32, 52 and 72 mm of glued strips and veneer-faced on both sides with a thickness of 3 mm



Рис. 2. Випробуваний зразок зі столярним щитом із ВЖД сосни, що личкований фанерою в момент тестування
Fig. 2. Test specimen with a block board made from a pine PCW which was faced with plywood at the time of testing (of breakage)

Результати експериментальних випробувань впливу ширини брусків на показники міцності при статичному згині звичайних столярних плит із ВЖД сосни представлено у табл. 2.

Дисперсію відтворюваності розраховуємо за формулою:

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

Підставивши дані у формулу 1, отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 11,7648/8 = 1,474$. Для визначення коефіцієнтів рівняння було використано відомі методики статистичної обробки даних і розраховано коефіцієнти рівняння регресії з перевіркою на їх значимість (табл. 3).

Для дисперсії адекватності (табл. 4):

$$\sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (2)$$

Визначаємо дисперсію адекватності:

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

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 2,9562 = 14,7881.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_{розр} = \frac{S_{більша}^2}{S_{менша}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4)$$

Підставивши дані у формулу 4, отримаємо розрахункове значення критерію Фішера: $F_{розр} = 14,7881 / 1,474 = 10,027$. Табличне значення критерію Фішера $F_{табл}$, яке залежить від рівня значи-

мості $q = 5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad} = 8-7 = 1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y = 8*(5-1) = 32$ становитиме: $F_{табл} = 252$.

Оскільки, $10,027 < 252$ ($F_{розр} < F_{табл}$), то 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 соснових рейок (радіал) $B_{рад}$ (x_1) і (тангентал) $B_{тан}$ (x_2).

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

$$y = 31,205 - 2,533x_1 - 4,795x_2 - 0,066x_1^2 + 0,66x_2^2 + 0,072x_1x_2.$$

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

$$\sigma_u = 54,863 - 0,1166B_{рад} - 0,4272B_{тан} - 0,0002B_{рад}^2 + 0,0017B_{тан}^2 + 0,0002B_{рад}B_{тан}.$$

Отже, ширина рейок в конструкції СП із ВЖД сосни суттєво впливає на межу міцності під час статичного згину σ_u . Обидва змінних фактори впливають обернено пропорційно. Найбільше на межу міцності під час статичного згину σ_u СП із ВЖД сосни з почерговим укладанням за кутом нахилу річних шарів радіальних (кут нахилу річних кілець у поперечному перерізі брусків 61-90°) і тангентальних (кут нахилу річних кілець у поперечному перерізі брусків 1-30°) впливає дру-

гий фактор $B_{\text{тан}}(x_2)$, тобто ширина тангентальних рейок. Вплив другого фактору на межі міцнос- ті під час статичного згину σ_u , порівняно з пер- шим (радіал) $B_{\text{рад}}(x_1)$, є в 3,7 (0,4272 / 0,1166) рази більшим. Графічну інтерпретацію залежностей зображено на рис. 3, 4.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії
 Table 2. Calculation of mean values and dispersion

№	Результати y_{ij} показника міцності при статичному згині конструкцій СП із ВЖД сосни, МПа					Середнє значення в j -ій вибірці	Дисперсія в j -ій вибірці
	y_{1j}	y_{2j}	y_{3j}	y_{4j}	y_{5j}		
1.	37,414	36,937	41,032	39,293	37,932	38,522	2,7460
2.	33,172	33,321	35,460	35,139	33,778	34,174	1,1182
3.	29,026	28,113	32,837	29,938	28,477	29,278	1,2327
4.	24,861	24,251	26,549	25,689	24,752	25,220	0,8185
5.	34,028	33,125	36,255	35,327	33,933	34,534	1,5482
6.	27,424	26,961	29,516	28,445	26,373	27,744	1,5560
7.	36,518	35,969	39,162	37,854	36,255	37,152	1,7845
8.	26,123	25,605	28,053	27,060	26,049	26,578	0,9607
Сума						253,20	11,7648

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів регресії математичної моделі
 Table 3. Calculation of regression coefficients of the mathematical model

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	31,205	1,237	знач.	29,97	32,44
b_1	-2,533	0,452	знач.	-2,98	-2,08
b_2	-4,795	0,452	знач.	-5,25	-4,34
b_{11}	-0,066	0,958	незнач.	-1,02	0,89
b_{22}	0,660	0,958	незнач.	-0,32	1,62
b_{12}	0,072	0,553	незнач.	-0,48	0,63

Таблиця 4. Розрахунок дисперсії адекватності
 Table 4. Calculation of the dispersion of adequacy

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
1	38,52	39,20	0,4584
2	34,17	33,99	0,0343
3	29,28	29,46	0,0343
4	25,22	24,54	0,4584
5	34,53	33,67	0,7436
6	27,74	28,61	0,7436
7	37,15	36,66	0,2418
8	26,58	27,07	0,2418
Сума			2,9562

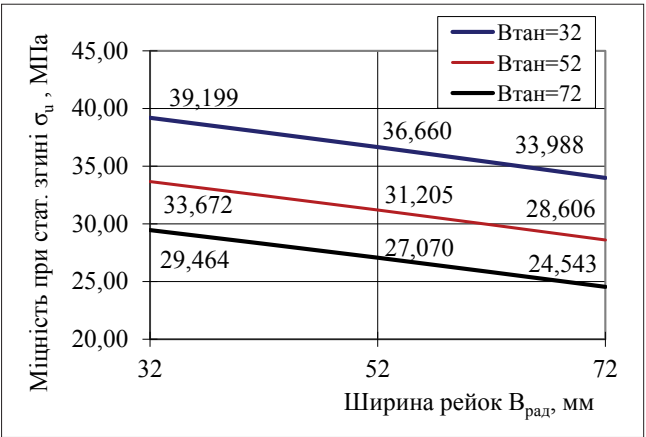


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини радіальної рейки $B_{\text{рад}}(x_1)$ в конструкції столярної плити з деревини сосни
 Fig. 3. Dependence of the strength limit during static bending σ_u on the width of the radial strips $B_{\text{рад}}(x_1)$ in the designs of a pine PCW-made blockboards

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

За результатами експерименту здійснено оптимізацію ширини рейок за допомогою градієнтного методу. Встановлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 39,199$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати, зафіксувавши розмірні параметри ширини соснових рейок СП із ВЖД комбінованого укладання: (радіал) $B_{\text{рад}}(x_1) = 32$ мм; (тангентал) $B_{\text{тан}}(x_2) = 32$ мм (рис. 5).

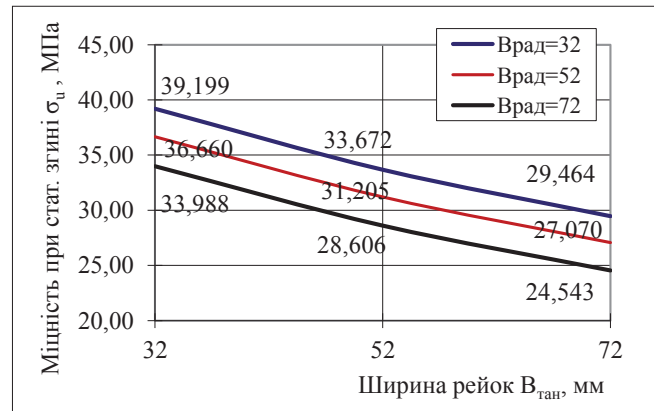


Рис. 4. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини тангентальної рейки $B_{\text{тан}}(x_2)$ в конструкції столярної плити з деревини сосни

Fig. 4. Dependence of the strength limit during static bending σ_u on the width of the tangential strips $B_{\text{тан}}(x_2)$ in the designs of a pine PCW-made blockboards

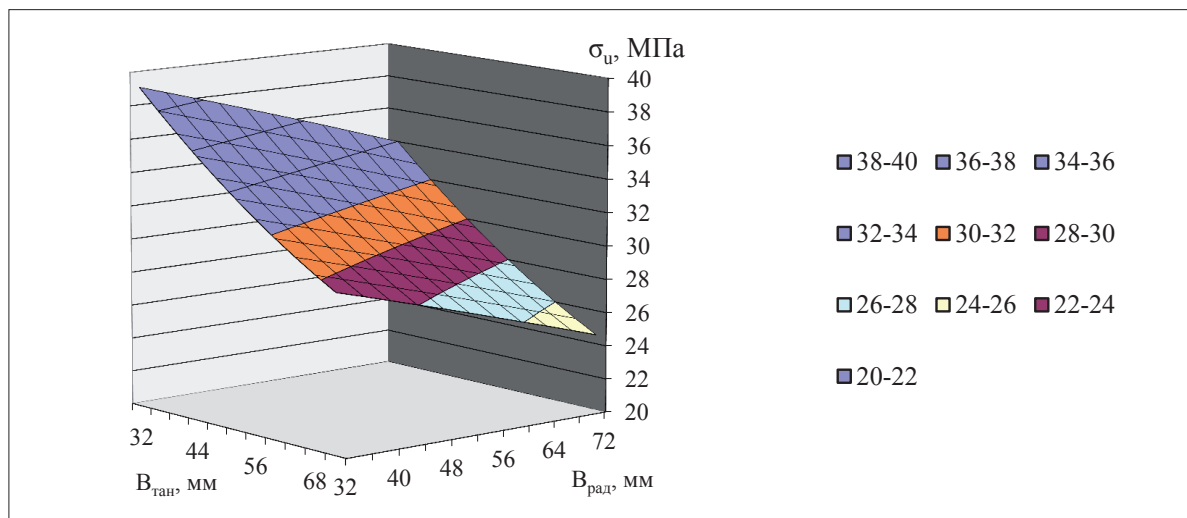


Рис. 5. Графічна залежність $\sigma_u = f(B_{\text{рад}}(x_1), B_{\text{тан}}(x_2))$

Fig. 5. Graphical dependence $\sigma_u = f(B_{\text{рад}}(x_1), B_{\text{тан}}(x_2))$

Дискусія (Discussion). В Україні на сьогодні існує проблема сировинних ресурсів, зокрема комплексного використання деревини. Потенційним джерелом деревинної сировини є різні деревинні відходи, зокрема, вживана деревина. Запропоновано використовувати у технологічних процесах деревообробки очищену ВЖД у масивному вигляді – для виробництва заготовок і столярної плити.

Методом почергового укладання рейок тангентального та радіального розпилювання з ширинами 32, 52 та 72 мм було отримано різні конструкції столярних плит із вживаної деревини сосни звичайної. Експериментальним шляхом визначено межу міцності під час статичного згину для СП із ВЖД сосни та побудовано математичну (регресійну) модель залежно від почергового укладання радіальних ($B_{\text{рад}}$) і тангентальних ($B_{\text{тан}}$) рейок ширинами 32, 52 та 72 мм. Отримана модель є адекватною, а, отже, може бути використана для опису об'єкта дослідження. Встановлено, що ширина

рейок у конструкціях СП із ВЖД завтовшки 22 мм суттєво впливає на міцнісні характеристики щитів. При цьому межа міцності під час статичного згину всіх СП із ВЖД сосни, не залежно від їхньої конструкції, задовольняє нормативні вимоги. Визначено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 39,199$ МПа можна отримати, зафіксувавши розміри ширин рейок СП із ВЖД із сосни комбінованого укладання на рівні: $B_{\text{рад}}(x_1) = 32$ мм, $B_{\text{тан}}(x_2) = 32$ мм. Крім того, отримані результати міцності СП із ВЖД на статичний згин були порівняні з результатами досліджень, викладених в інших наукових працях, присвячених використанню вживаної деревини для створення щитових конструкційних матеріалів.

Питання ширини рейок є дискусійним і на сьогодні. За даними дослідників (Кривик, Масевський, 2011), найбільший вплив має геометрія рейок, тобто поперечні розміри (відношення між шириною і товщиною) та вид підготовлених рейок, який

характеризується кутом нахилу річних кілець до пласти майбутнього щитового виробу. Так, науковці під час дослідження клеєних щитів із деревини дуба для виготовлення тахель фасадних поверхонь рекомендують використовувати рейки завширшки 40 мм за кута нахилу 68° , а у випадку використання лише радіальних рейок максимальна ширина може становити 67,9 мм. Також запропоновано (Кривик, Маєвський, 2011) використовувати співвідношення сторін у поперечному перерізі рейок як 1:3 із середнім кутом нахилу 45° . Згідно з нормативними вимогами для СП типу СР із склеєних рейок, ширина брусків з первинної деревини повинна бути не більше 40 мм для звичайної, і 20 мм – для підвищеної точності. За стандартом ДСТУ DIN 68705-2:2014-10, ширина рейок повинна бути меншою 30 мм. У виробничій діяльності трапляється використання рейок від 40 до 80 мм.

Підбір характеристик рейок для звичайних СП із ВЖД є визначальним для розроблення конструкцій, прогнозування фізико-механічних показників СП із ВЖД, дає змогу встановити раціональні схеми укладання рейок, застосовувати оптимальне співвідношення сторін у перерізі рейок для конструкцій плит. Встановлено, що збільшення ширини від 32 до 72 мм під час визначення межі міцності при статичному згині призводить до зменшення показника міцності для радіальних рейок – на 13,29-16,70, а для тангентальних – на 24,83-27,79%.

Рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва столярних плит з перерізом рейок у співвідношенні не більшим як 1:5 при комбінованому укладанні радіальних і тангентальних рейок, а при довільному укладанні – у відношенні не більшим як 1:3. Розроблено практичні рекомендації для виробництва СП із ВЖД: вологість рейок – $8 \pm 2\%$; ширина – у 3-5 разів більша, ніж товщина; розташування рейок – радіальне або під кутом більше 45° ; личкування – фанерою завтовшки 3 мм; витрата клею для щита – 200-250 г/м²; витрата клею для личкування СП – 150-200 г/м²; температура ваими для щита – 85-90°C; температура пресу для СП – 115-125°C; час витримки під тиском для щита – 30-40 хв; час витримки під тиском для СП – 4-6 хв; тиск для щита – 0,5-1,0 МПа, для СП – 1,2-1,3 МПа.

Результати досліджень підтверджують доцільність використання вживаної деревини для виготовлення столярних плит, але для отримання високих показників міцності необхідно дотримуватись запропонованих практичних рекомендацій.

Висновки (Conclusions). Будь-які деревинні ресурси повинні використовуватись раціонально і комплексно, зокрема залишки від різних стадій обробки первинної деревини – від лісозаготівлі до створення готових виробів. На сьогодні дуже актуально постало питання перероблення вживаної деревини як додаткового ресурсу, яка у виробках вже втратила свої споживчі характеристики, і яка, за правильного перероблення, мінімізує негативний

вплив на довкілля. Підготовлено партію столярних плит із вживаної деревини (СП із ВЖД) сосни звичайної шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними є ширина рейок тангентального та радіального розпилювання.

Визначено експериментальним шляхом межу міцності під час статичного згину для СП із ВЖД сосни та побудовано адекватну математичну (регресійну) модель залежно від почергового укладання радіальних ($B_{\text{рад}}$) і тангентальних ($B_{\text{тан}}$) рейок завширшки 32, 52 та 72 мм. Ширина рейок в конструкціях СП із ВЖД товщиною 22 мм суттєво впливає на міцнісні характеристики щитів.

Збільшення ширини рейок від 32 до 72 мм під час визначення межі міцності при статичному згині призводить до зменшення показника для радіальних рейок на 13,29-16,70, а для тангентальних – на 24,83-27,79%. Межа міцності під час статичного згину всіх СП із ВЖД сосни, незалежно від їхньої конструкції, задовольняє нормативні вимоги. Максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 39,199$ МПа можна отримати, зафіксувавши розміри ширин рейок СП із ВЖД із сосни комбінованого укладання на рівні: $B_{\text{рад}}(x_1) = 32$ мм, $B_{\text{тан}}(x_2) = 32$ мм.

Рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва столярних плит з перерізом рейок у співвідношенні не більшим як 1:5 при комбінованому укладанні радіальних і тангентальних рейок в конструкцію столярної плити, а при довільному укладанні – у відношенні не більшим ніж 1:3.

Список літератури (References)

- Білий, Я. М., Гайда, С. В. (2016). Дослідження формостійкості клеєних щитів із вживаної деревини. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 42, 69-79. [Bilyy, Ya. M., & Gayda, S. V. (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 42, 69-79. <https://doi.org/10.36930/42164211>] (in Ukrainian)
- Войтович, І. Г., Гайда, С. В., Оріховський, Р. Я. (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 46, 36-49. [Voytovych, I. G., Gayda, S. V., & Orikhovskyy, R. Ya. (2020). Research of technological processes of production of legs of tables of various designs. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 36-49. <https://doi.org/10.36930/42204604>] (in Ukrainian)
- Гайда, С. В. (2017а). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 43, 58-72. [Gayda, S. V. (2017). 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. <https://doi.org/10.36930/42174308>] (in Ukrainian)

- Гайда, С.В. (2017b). Технологии и свойства мебельного щита из вторично используемой древесины. *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 48, 34-38. [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)
- Гайда, С.В., Ільків, М.М., Савка, Д.Б. (2021). Дослідження технологічних процесів виготовлення меблевих фасадів з масивної деревини. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 47, 22-33. [Gayda, S.V., Ilkiv, M.M., & Savka, D.B. (2021). Research of technological processes of manufacture of meble facades from solid wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 22-33. <https://doi.org/10.36930/42214703>] (in Ukrainian)
- Гайда, С.В., Кійко, О.А. (2018). Формостійкість як критерій якості столярних плит із вживаної деревини. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 17, 185-192. [Gayda, S.V., & Kiyko, O.A. (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834>] (in Ukrainian)
- Гайда, С.В., Кійко, О.А. (2021). Властивості вживаної деревини як важливий чинник якості конструкційних матеріалів. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 23, 152-162. [Gayda, S.V., & Kiyko, O.A. (2021). Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 23, 152-162. <https://doi.org/10.15421/412135>] (in Ukrainian)
- Гайда, С.В., Салапак, Л.В., Лесів, Л.Е. (2021). Визначення ефективного технологічного процесу виготовлення різних опорних елементів для функціональних площин. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 47, 58-72. [Gayda, S.V., Salapak, L.V., & Lesiv, L.E. (2021). Determination of an efficient technological process of manufacturing various support elements for functional surfaces. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 58-72. <https://doi.org/10.36930/42214708>] (in Ukrainian)
- Грицак, С.А., Гайда, С.В. (2020). Порівняльний аналіз фізико-механічних характеристик гнутих елементів із різних порід дерев. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 46, 16-27. [Grytsak, S.A., & Gayda, S.V. (2020). Comparative analysis of physical and mechanical characteristics of bent elements from different tree species. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 16-27. <https://doi.org/10.36930/42204602>] (in Ukrainian)
- Грицак, С.А., Гайда, С.В., Кушпін, А.С., Салапак, Л.В. (2023). Аналіз ефективності конструктивних та технологічних рішень у виробництві складальних одиниць гратчастих меблевих виробів. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 49, 61-72. [Grytsak, S.A., Gayda, S.V., Kushpit, A.S., & Salapak, L.V. (2023). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 61-72. <https://doi.org/10.36930/42234905>] (in Ukrainian)
- Дяк, Т.П., Гайда, С.В. (2011). Аналіз економічної ефективності використання вживаної деревини для виробництва деревинно-стружкових плит для ТОВ «Свиспан Лімітед». *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 37(2), 129-136. [Dyak, T.P., & Gayda, S.V. (2011). The analysis of economic efficiency of post-consumer wood use for particleboard manufacture for LLC Swisspan Limited. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 37(2), 129-136. <https://doi.org/10.36930/421137221>] (in Ukrainian)
- Кривик, О.О., Маєвський, В.О. (2011). Динаміка зміни формостійкості щитів клеєних з поєднанням різних порід деревини. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 37.1, 30-33. [Kryvyk, O.O., & Mayevskyy, V.O. (2011). Dynamics of shape stability change for glued panels with a combination of different wood species. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 37.1, 30-33. Retrieved from <https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/156>] (in Ukrainian)
- Лесів, Л.Е. (2022). Дослідження характеристик комбінованих столярних плит із вживаної деревини. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 48, 69-86. [Lesiv, L.E. (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806>] (in Ukrainian)
- Лесів, Л.Е., Гайда, С.В. (2023). Математична модель прогнозування обсягів утворення вживаної деревини. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 49, 33-47. [Lesiv, L.E., & Gayda, S.V. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>] (in Ukrainian)
- Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. (2024). Розроблення математичної моделі міцності з'єднаних заготовок із вживаної деревини ялиці. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 50, 16-28. [Lesiv, L.E., Gayda, S.V., & Salapak, L.V. (2024). Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 16-28. <https://doi.org/10.36930/42245002>] (in Ukrainian)
- Медвідь, Л.В. (2018). Систематизація деревинних відходів – основа їх ефективного використання. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 44, 91-104. [Medvid, L.V. (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412>] (in Ukrainian)
- Медвідь, Л.В. (2021). Вживана деревина – додатковий резерв сировини для конструкційних ма-

- теріалів. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 47, 34-46. [Medvid, L. V. (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706>] (in Ukrainian)
- Медвідь, Л.В., Гайда, С.В. (2023). Визначення показників міцності звичайних столярних плит із вживаної деревини. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 49, 85-98. [Medvid, L. V., & Gayda, S. V. (2023). Determination of the strength indicators of normal blockboard made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 85-98. <https://doi.org/10.36930/42234907>] (in Ukrainian)
- Оріховський, Р.Я., Гайда, С.В. (2024). Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 50, 41-51. [Orikhovskyy, R. Ya., & Gayda, S. V. (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of wood-working. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 41-51. <https://doi.org/10.36930/42245004>] (in Ukrainian)
- Петришак, І.В., Гайда, С.В. (2020). Дослідження впливу породи та режимів шліфування на питому продуктивність шліфувальної шкурки. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 46, 5-15. [Petryshak, I. V., & Gayda, S. V. (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601>] (in Ukrainian)
- Петришак, І.В., Гайда, С.В., Гуменюк, Ж.Я. (2023). Встановлення впливу режимів шліфування на різнотовщинність меблевих щитів. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 49, 20-32. [Petryshak, I. V., Gayda, S. V., & Humeniuk, Zh. Ya. (2023). Establishing the influence of grinding modes on different thicknesses of furniture panels. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 20-32. <https://doi.org/10.36930/42234902>] (in Ukrainian)
- Подібка, Т.І., Кійко, О.А. (2019). Дослідження впливу поперечних розмірів букових рейок на формостійкість меблевих щитів. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 45, 155-171. [Podibka, T. I., & Kiyko, O. A. (2019). 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. <https://doi.org/10.36930/42194521>] (in Ukrainian)
- Bezama, A. (2016). Let us discuss how cascading can help implement the circular economy and the bio-economy strategies. *Waste Management & Research*, 34, 593-594. <https://doi.org/10.1177/0734242X16657973>
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The emergence of circular economy: a new framing around prolonging resource productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 21, 603-614. <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>
- Circularity Gap Report (2022). Five years of analysis by Circle Economy https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/1._report_cgr_global_2022
- DIN 68725-2:2014-10 Plywood – Part 2: Blockboard and laminboard for general use. Germany. (in Deutsch)
- 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. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- 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. <https://doi.org/10.36930/42154106>
- Gayda, S. V. (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 42, 33-50. <https://doi.org/10.36930/42164206>
- Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2020a). 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>
- Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2020b). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. *Poznan: Drewno*, 63(206), 77-102. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>
- Gayda, S. V., & Maksymiv, V. M. (2010). From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 36, 57-77. <https://doi.org/10.36930/42103610>
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- 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.
- Ratajczak, E., & Szostak, A. (2003). Zasoby odpadów drzewnych w Polsce. *Czysta Energia*, 6, 122-125. [Ratajczak, W., & Szostak, A. (2003). Resources of wood waste in Poland. *Clean Energy*, 6, 122-125. Retrieved from <https://www.drewno.pl/artykuly/1399,zasoby-odpadow-drzewnych-w-polsce.html>] (in Polish)

- Reike, D., Vermeulen, W.J.V., & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246-264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859>
- Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, H.S., Vanguelova, E., Stupak, I., Evans, A. ... Reece, P. (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energy, Sustainability and Society*, 11(10). <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>
- 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. <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1318549>
- 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. *Environmental Science & Policy*, 13(1), 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004>

Construction of the mathematical model of the strength of post-consumer wood made blockboard of different designs

S. Gayda¹, L. Medvid²

It is substantiated that any wood resources should be used rationally and comprehensively, in particular this applies to wood residues from various stages of primary wood processing – from logging to the creation of finished products. Secondly, according to the principles of the circular economy, the issue of processing post-consumer wood (PCW) as an additional resource of wood, which has already lost its consumer characteristics in products, and which, with proper processing, minimizes the negative impact

on the environment, has become more relevant than ever. Thirdly, this partially solves the problems related to the increase of wood residues and waste, the accumulation of used wood in landfills, as well as environmental problems. A batch of pine PCW-made blockboards was prepared by implementing a second-order B-plan, where the variables were the width of the strips of tangential and radial sawing. The strength limit during static bending for pine PCW-made blockboard was determined experimentally and an adequate mathematical (regression) model was constructed depending on the alternate laying of radial (B_{rad}) and tangential (B_{tan}) strips with widths of 32, 52 and 72 mm. It was found that the width of the strips in blockboard structures with 22 mm thick PCW significantly affects the strength characteristics of the blockboard cores. It was found that an increase in width from 32 to 72 mm during the determination of the strength limit in static bending leads to a decrease in the indicator for radial strips by 13.29-16.70%, and for tangential strips by 24.83-27.79%. It was established that the strength limit during static bending of all pine PCW-made blockboards, regardless of their design, meets the regulatory requirements. According to the results of experimental studies, it was established that the maximum value of the strength limit during static bending $\sigma_u = 39.199$ MPa can be obtained by fixing the dimensions of the widths of the strips of pine PCW-made blockboard of combined laying at the level: $B_{rad}(x_1) = 32$ mm, $B_{tan}(x_2) = 32$ mm. Based on practical experience, it is recommended to use post-consumer wood (PCW) for the production of blockboards with a cross-section of strips in a ratio of no more than 1:5 in the case of combined radial and tangential laying, and in case of random laying – in a ratio of no more than 1:3. Practical recommendations for the production of PCW-made blockboard have been developed: moisture content of strips – $8 \pm 2\%$; for rails: the width should be 3-5 times the thickness; arrangement of strips – radial or at an angle of more than 45° ; facing – 3 mm thick plywood; consumption of glue for the blockboard core – 200-250 g/m²; glue consumption for the blockboard facing – 150-200 g/m²; the temperature of the clamp for the blockboard core is 85-90 °C; the temperature of the press for PCW-made blockboard – 115-125 °C; the exposure time under pressure for the blockboard core is 30-40 minutes; holding time under pressure for PCW-made blockboard – 4-6 minutes; pressure for blockboard core – 0.5-1.0 MPa; for PCW-made blockboard – 1.2-1.3 MPa. Sorted and sawn to the appropriate cross-sectional dimensions, strips made from PCW of various species can be used to manufacture glued panel elements, in particular, blockboards and furniture panels. Therefore, the development of practical recommendations is certainly the basis for the rapid introduction of PCW into production processes.

Key words: regression model, static bending strength, bonding strength, technology, glued structures, furniture panel, recycling, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), circular economy.

¹ Serhiy Gayda – Corresponding Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Furniture Production Techniques and Wood Products Technology. Ukrainian National Forestry University. 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-258-31-75. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661>

² Lyubomyr Medvid – Postgraduate student at the Department of Furniture Production Techniques and Wood Products Technology. Ukrainian National Forestry University. 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-258-31-75. E-mail: lyubomyr.medvid@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6654-9348>